

Ю. Н. ПЧЕЛЬНИКОВ
В. Т. СВИРИДОВ

ЭЛЕКТРОНИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Основана в 1947 году

Выпуск 1039

Ю. Н. ПЧЕЛЬНИКОВ, В. Т. СВИРИДОВ

ЭЛЕКТРОНИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1981

ББК 32.85
П92
УДК 621.385.6

Пчельников Ю. Н., Свиридов В. Т.

П92 Электроника сверхвысоких частот. — М.: Радио и связь, 1981. — 96 с., ил. — (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1039).

65 к.

В популярной форме рассматриваются принципы работы, особенности конструкций и основные области применения электронных приборов сверхвысоких частот. Кратко описаны физические явления, сопровождающие взаимодействие электронов со статическими и переменными электрическими и магнитными полями, а также устройство объемных резонаторов и замедляющих систем, являющихся неотъемлемыми частями СВЧ приборов.
Для подготовленных радиолюбителей.

П $\frac{30404-154}{046(01)-81}$ 216—81 (Э.) 2402020000 ББК 32.85
6Ф0.3

РЕЦЕНЗЕНТ ДОКТОР ТЕХН. НАУК Н. И. ЧИСТЯКОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая читателю книга ставит задачу дать физические представления о работе электронных приборов СВЧ и их применении в различных отраслях народного хозяйства.

Если в 40—50-х годах электроника СВЧ в основном служила потребностям радиолокации и связи, то в последние годы она все шире применяется во многих отраслях хозяйства, ускоряя научно-технический прогресс, повышая эффективность и качество производства.

Появлению новых областей применения мощной СВЧ электроники способствует ряд специфических свойств электромагнитных колебаний этого диапазона частот, которые позволяют создать неосуществимые ранее технологические процессы или значительно их улучшить. К ним относятся, например: создание сверхчистой плазмы с широким интервалом температур; возможность серийного изготовления простых по конструкции и удобных в эксплуатации мощных генераторов СВЧ энергии, с помощью которых могут осуществляться полимеризация и упрочнение различных изделий и материалов, в частности шин и лакокрасочных покрытий, упрочнение металлов, стабилизация параметров полупроводников и т. д.; все более широкое применение получают нагрев и сушка с помощью СВЧ различных материалов, в частности приготовление и разогрев пищи, пастеризация молока и т. п.

Познакомить читателя с возможностями СВЧ электроники — одна из главных задач этой книги. При работе над рукописью были использованы материалы научно-технических статей, опубликованных в журналах «Электронная техника», «Радио», «За рубежом» и др.

Замечания и пожелания по данной книге просим присылать по адресу: 101000, Москва, Главный почтамт, а/я 693, Массовая радиобиблиотека.

Авторы

1* Зак 416

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ В ПЕРЕДАЮЩИХ ЛИНИЯХ, РЕЗОНАТОРАХ И ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

ОСОБЕННОСТИ ДИАПАЗОНОВ ОВЧ, УВЧ, СВЧ, КВЧ И ГВЧ

Международный консультативный комитет по радио (МККР) в 1975 г. рекомендовал систему разделения и наименования полос в спектре электромагнитных колебаний, применяемых для радиосвязи, радиовещания и телевидения. Согласно этим рекомендациям диапазоны частот имеют следующие названия и частотные границы:

крайне низкие частоты (КНЧ), 3—30 Гц;
сверхнизкие частоты (СНЧ), 30—300 Гц;
инфранизкие частоты (ИНЧ), 300—3000 Гц;
очень низкие частоты (ОНЧ), 3—30 кГц;
низкие частоты (НЧ), 30—300 кГц;
средние частоты (СЧ), 300—3000 кГц;
высокие частоты (ВЧ), 3—30 МГц;
очень высокие частоты (ОВЧ), 30—300 МГц;
ультравысокие частоты (УВЧ), 300—3000 МГц;
сверхвысокие частоты (СВЧ), 3—30 ГГц;
крайне высокие частоты (КВЧ), 30—300 ГГц;
гипервысокие частоты (ГВЧ), 300—3000 ГГц.

Таким образом, к сверхвысоким частотам относятся пять диапазонов: ОВЧ, УВЧ, СВЧ, КВЧ и ГВЧ. Именно в этих диапазонах рассматриваются в настоящей книге физические явления в приборах и устройствах и их практическое применение; к ним будем применять термин СВЧ, если не будет специальной оговорки. (К СВЧ в 50—60 гг. относили участок спектра электромагнитных колебаний между 30 МГц и 3000 ГГц. Этим граничным частотам соответствуют длины волн 10 м и 0,1 мм.)

Электромагнитные колебания распространяются в свободном пространстве (например, от передающей станции к приемной) в виде волн:

$$\lambda = c/f,$$

где λ — длина волны, м; c — скорость распространения света, $c=3\cdot10^8$ м/с; f — частота, Гц.

При подсчете по этой формуле граничным частотам приведенных диапазонов соответствуют определенные значения длин волн. Если определять диапазоны не частотами, а длинами волн, то диапазон ОВЧ может быть назван диапазоном метровых волн ($\lambda=10\div1$ м); УВЧ — дециметровым диапазоном ($\lambda=10\div1$ дм); СВЧ — сантиметровым ($\lambda=10\div1$ см), КВЧ — миллиметровым ($\lambda=10\div1$ мм), а ГВЧ — децимиллиметровым ($\lambda=1\div0{,}1$ мм). Эти названия диапазонов также будут встречаться в данной книге.

Электромагнитные колебания и волны первоначально использовались для радиосвязи и радиовещания. С 30-х годов области применения радиоволн быстро расширялись. Исторически развитие радиоэлектроники шло по пути освоения все более высоких частот. К настоящему времени практически освоен весь спектр электромагнитных колебаний, занимающий диапазон частот от единиц до 10^{12} Гц (децимиллиметровые волны), а также участки спектров в инфракрасном, оптическом и в еще более высокочастотных диапазонах.

В диапазонах УВЧ, СВЧ и КВЧ длина волны становится соизмеримой с размерами элементов цепей, проводников, ламп и т. д. Значит, энергия быстро-

переменных токов в проводниках все более интенсивно излучается в окружающее пространство в виде электромагнитных волн. Если проводники являются элементами антенн, то излучение электромагнитной энергии в окружающее пространство полезно и используется для передачи информации по радио, а указанная особенность СВЧ диапазона позволяет уменьшить размеры антенн и облегчить возможность создания направленного излучения и приема электромагнитных колебаний. В радиотехнических же схемах за счет излучения происходит увеличение потерь и возникают нежелательные и обычно неконтролируемые связи между элементами. Поэтому при переходе к СВЧ диапазону конструкции элементов схем и электронных приборов должны быть изменены так, чтобы электромагнитные поля их полностью находились внутри замкнутых металлических объемов.

По мере увеличения частоты затрудняется применение элементов радиотехнических схем с сосредоточенными постоянными: конденсаторов, катушек индуктивности, резисторов. Так, например, емкостная проводимость между витками катушки индуктивности становится в СВЧ диапазоне настолько большой, что катушка представляет собой последовательность соединенных LC-контуров, а не «чистую» индуктивность. В СВЧ диапазоне размеры соединительных проводников, в частности выводов электронных и полупроводниковых приборов, становятся сравнимыми с длиной волны и пренебрегать их индуктивным сопротивлением уже нельзя.

Другой особенностью рассматриваемых диапазонов частот является характер протекания быстропеременных токов по проводникам. Если на постоянном токе и на низких частотах плотность тока по поперечному сечению проводника практически постоянна, то при увеличении частоты на несколько порядков по сравнению с частотой переменного тока в электросети ток в основном будет протекать в тонком поверхностном слое проводника. При этом плотность тока экспоненциально уменьшается от своего максимального значения на поверхности вглубь проводника. Толщину поверхности слоя (часто называемого «скин-слоем») полагают равной такой толщине, на которой плотность тока уменьшается в е раз ($e \approx 2{,}72$ — основание натуральных логарифмов). Если теперь положить, что плотность тока по толщине скин-слоя одинакова и равна ее максимальному значению на поверхности, то произведение максимальной величины плотности тока на толщину скин-слоя оказывается равным истинному значению тока в проводнике.

Поверхностный эффект, характеризующийся вытеснением тока к поверхности проводника по мере роста частоты колебаний, объясняется возрастанием индуктивного сопротивления X_L ($X_L = \omega L$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, а L — индуктивность проводника). При этом индуктивность тем меньше, чем больше радиус, по которому протекает ток. Так как индуктивное сопротивление возрастает пропорционально увеличению частоты, то чем выше частота, тем более существенно различие в индуктивном сопротивлении внешнего и внутренних слоев проводника. Поэтому СВЧ ток протекает там, где индуктивное сопротивление проводника минимально, т. е. вблизи его поверхности

Третьей особенностью рассматриваемых диапазонов частот является характер передачи энергии электромагнитных колебаний. Энергия распространяется в основном вне проводников, которые либо ограничивают пространство, где распространяется энергия (волноводы, коаксиальные линии), либо задают направление распространения энергии (проводники двухпроводных линий, однопроводная линия передачи).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ВОЛНОВОДАХ, КОАКСИАЛЬНЫХ И ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

К широкому классу радиоволноводов относятся самые различные устройства, вдоль которых могут распространяться электромагнитные волны. Это открытые двухпроводные линии (рис. 1,*а*), коаксиальные кабели (рис. 1,*б*), волноводы в виде полых металлических труб различного поперечного сечения (прямоугольного, круглого, П-образного и Н-образного, рис. 1,*в*) и замедляющие системы (например, спиральная в экране и типа гребенки, рис. 1,*д*). Вдоль последних электромагнитные волны распространяются со скоростью, в несколько раз меньшей скорости света. Замедляющие системы отдельно рассматрива-

ются далее. К радиоволноводам относятся также диэлектрические волноводы (рис. 1,*г*), представляющие собой стержни из диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью, а также полосковые (ленточные) симметричные (рис. 1,*е*) и несимметричные (рис. 1,*ж*) линии.

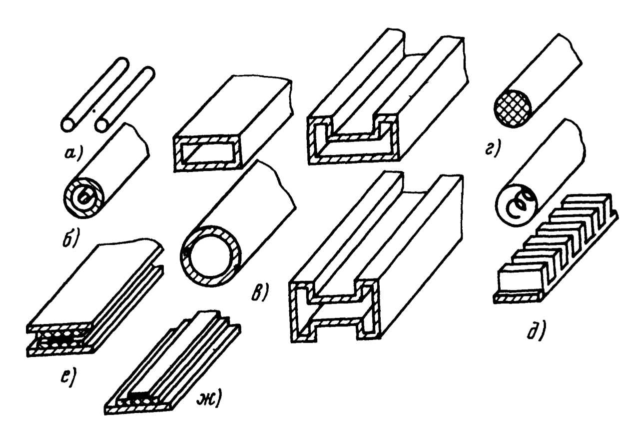


Рис. 1. Виды радиоволноводов

Применение коаксиальных и открытых двухпроводных линий в диапазоне СВЧ имеет ряд ограничений. Дело в том, что с укорочением длины волны расстояние между проводниками двухпроводной линии приходится уменьшать с целью снижения потерь энергии на излучение. При этом увеличивается опасность электрического пробоя при передаче по линии больших мощностей, а допуски на точность изготовления становятся все более жесткими. Поэтому на дециметровых волнах неэкранированная симметричная двухпроводная линия находит ограниченное применение. Ее используют обычно на волнах длиннее 2—5 м.

Коаксиальный кабель, являясь экранированной линией, широко применяется как в УВЧ, так и СВЧ диапазонах. Однако и здесь с повышением частоты увеличиваются потери в металлических проводниках (особенно во внутреннем) и диэлектрике, который необходим для крепления внутренней жилы кабеля. Кроме того, при укорочении длины волны приходится уменьшать расстояние между внутренним и наружным проводниками кабеля, что приводит к ограничению уровня передаваемой мощности. Поэтому на волнах короче 8—10 см коаксиальные кабели применяются реже, чем волноводы. При малой передаваемой мощности (милливатты — микроватты) и небольшой длине (около 1 м) коаксиальные кабели находят применение и на волнах около 3 см (в основном в измерительной аппаратуре и в приемных трактах).

Волноводы обладают рядом преимуществ по сравнению с коаксиальными и двухпроводными линиями. Для них характерны простота формы и жесткость конструкции. Все электромагнитное поле заключено внутри волновода, поэтому нет потерь энергии на излучение, как в открытой двухпроводной линии. В коаксиальных линиях для установки центрального проводника вдоль оси внешнего проводника применяется обычно диэлектрик, потери в котором складываются с общими потерями линии. Внутри волновода в большинстве случаев имеется либо воздух, либо вакуум (в волноводах электронных приборов СВЧ). Таким образом, в волноводах при воздушном их заполнении или при откачке до высокого вакуума потери в диэлектрике пренебрежимо малы. А так как внутри волноводов нет диэлектрика и центрального проводника, то пробивная прочность их больше, чем у коаксиальной линии. Наконец, потери в стенках волновода также меньше по сравнению с потерями в коаксиальном кабеле, в котором по внутреннему проводнику протекает ток большей плотности при одинаковой передаваемой мощности и одной и той же длине волны. Инте-

ресно отметить, что в диапазоне 5—12 см затухание волны в волноводе составляет примерно 0,01 дБ на 1 м длины, что приблизительно соответствует 1/2000% мощности. В то же время в коаксиальном кабеле затухание равно примерно 1 дБ/м в этом же диапазоне волн. При затухании 1 дБ/м на 1 м кабеля мощность электромагнитных колебаний уменьшается на 26%. [Напомним, что ослабление сигнала в децибелах равно $10\lg(P_1/P_2)$, где P_1 и P_2 — мощности соответственно на входе и выходе участка СВЧ тракта. В СВЧ технике в децибелах измеряют также и усиление сигнала. Для «освоения» понятия децибел полезно запомнить следующее: если P_1 в 2 раза больше P_2, то говорят, что P_1 больше P_2 на 3 дБ, если P_1 больше P_2 в 10 раз, — то на 10 дБ, если в 100 раз, — то на 20 дБ, если в 1000 раз, — то на 30 дБ и т. д. Изменения уровня мощности на нескольких соседних участках волновода, выраженные числом P_1/P_2, надо умножать для определения полного изменения мощности, а эти же изменения, выраженные в децибелах, нужно складывать. По этому правилу ослабление на 36 дБ равно 30 дБ+3 дБ+3 дБ, что соответствует изменению мощности на этом же участке тракта в $1000\times2\times2=4000$ раз. Ослаблению на 47 дБ (50—3) соответствует изменение мощности в $100\,000/2=$ $=50\,000$ раз.]

Несмотря на отмеченные преимущества волноводов, с укорочением длины волны начинают проявляться и их недостатки. Вследствие уменьшения размеров поперечного сечения понижается пробивная прочность. Кроме того, происходит увеличение потерь в стенках волновода. Наряду с этим существенным недостатком волноводов является зависимость скорости распространения волны от частоты (дисперсия), что приводит к искажению сигнала и ограничению полосы пропускания. Так, в ряде случаев полосы частот, занимаемые сигналами, оказываются шире полосы частот, рекомендуемой для конкретного типа волновода с заданными размерами поперечного сечения. Для полного перекрытия по частоте в сантиметровом и миллиметровом диапазонах приходится изготовлять несколько волноводов стандартных поперечных сечений, снабжая каждый из них комплектом измерительной аппаратуры.

В настоящее время также широко применяется сравнительно новый тип передающих линий — так называемые полосковые или ленточные линии. Как показано на рис. 1,*е*, *ж*, они состоят из металлических лент, пространство между которыми может быть заполнено твердым диэлектриком или воздухом. Хотя ленточные волноводы нельзя назвать полностью экранированными, излучение из них невелико. Эти линии более широкополосны, чем волноводы, имеют меньшие габариты и весьма просты в изготовлении.

Типы волн в передающих линиях. Простейшим типом электромагнитной волны является плоская поперечная волна, которую принято обозначать ТЕМ (буква Т — начальная буква английского слова transverse, что означает «поперечный; Е и М — начальные буквы слов electric и magnetic, т. е. «электрический» и «магнитный»); в поперечной электромагнитной волне силовые линии электрического и магнитного полей расположены в поперечных плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Волна ТЕМ распространяется в свободном пространстве вдали от передающей антенны, а также вдоль открытой двухпроводной линии и между проводниками коаксиальной линии, если проводники считать идеально проводящими.

В любой электромагнитной волне, в том числе и в волне ТЕМ, электрическое и магнитное поля изменяются во времени и в пространстве по синусоидальному закону. Изменение электрического поля в какой-либо точке пространства всегда сопровождается появлением изменяющегося магнитного поля и наоборот. Оба поля существуют одновременно и совместно, образуя единое электромагнитное поле. Изменения электрического и магнитного полей в распространяющейся или, как говорят, «бегущей» электромагнитной волне совпадают по фазе, т. е. нарастание одного поля соответствует нарастанию другого, и максимума амплитуд они достигают одновременно. Кроме того, силовые линии электрического и магнитного полей в такой волне взаимно перпендикулярны в пространстве. Магнитные силовые линии всегда являются замкнутыми линиями, а электрические силовые линии либо идут от заряда одного знака к заряду другого знака (направлены от положительного заряда к отрицательному), либо, как и магнитные силовые линии, могут быть замкнутыми.

Движущееся электромагнитное поле есть электромагнитная волна. Сила **F**, с которой поле действует на неподвижные электрические заряды, характеризуется напряженностью электрического поля **E**:

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E},$$

где q — величина заряда.

Напряженность поля является вектором, т. е. направленной величиной, которая имеет не только числовое значение, но и определенное направление.

Наиболее распространены два способа обозначения полей на чертежах: при первом направления векторов **E**, **H** и **v** совмещают с осями прямоугольной системы координат, при втором — только два из трех векторов лежат в плоскости рисунка, а направление третьего указывается или точкой (вектор направления перпендикулярно плоскости чертежа к наблюдателю), или крестиком (вектор направления от наблюдателя).

Если на пути распространения электромагнитной волны встречаются среды с различными свойствами, то на границе раздела этих сред напряженности электрического и магнитного полей должны удовлетворять так называемым граничным условиям. В частности, если пренебречь потерями, то на границе воздуха с металлом электрическое поле всегда перпендикулярно, а магнитное поле параллельно металлической поверхности.

Электромагнитное поле ТЕМ-волны в коаксиальной линии заключено в пространстве между внутренним и наружным металлическими проводниками линии (рис. 2). При передаче по коаксиальной линии высокочастотной энергии

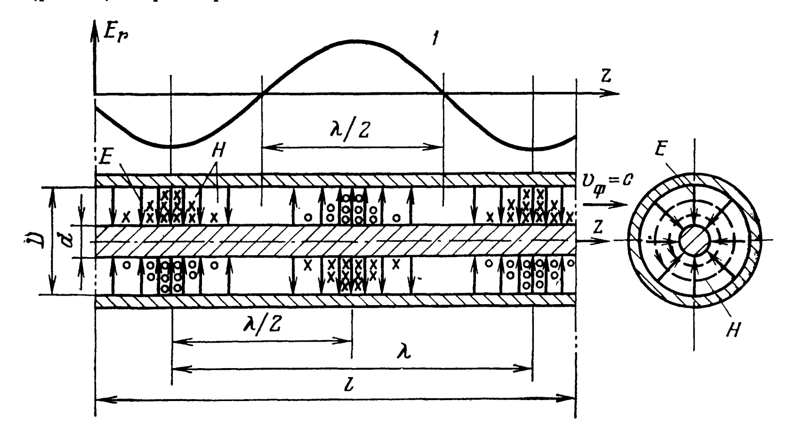


Рис. 2. Структура электрического и магнитного полей бегущей волны типа ТЕМ в коаксиальной линии

(1 — распределение напряженности электрического поля вдоль линии для фиксированного момента времени t)

по проводникам ее текут быстропеременные электрические токи, которые благодаря поверхностному эффекту сосредоточены в очень тонком слое металла, составляющем единицы микрометров, причем этот слой тем тоньше, чем выше электропроводность металла и чем выше частота сигнала. Важно подчеркнуть, что слои металла, по которым протекают высокочастотные токи, всегда являются пограничными между металлом и диэлектриком, в котором распространяется электромагнитная волна. Таким образом, в коаксиальной линии высокочастотные токи текут по наружному слою центрального проводника и по внутреннему слою оболочки. Благодаря этому свойству коаксиальная линия является полностью экранированной линией передачи электромагнитных волн.

Структуру электромагнитного поля различных типов волн (см. рис. 2) принято показывать в виде соответствующего расположения силовых линий электрического (сплошные линии) и магнитного (пунктирные линии) полей для фиксированного момента времени. Чем гуще расположены силовые линии, тем больше напряженность поля вблизи данной точки пространства. Такое, хотя и

грубое, изображение величин полей дает возможность выяснить их важнейшие особенности. Например, из рис. 2 видно, что электрические силовые линии ТЕМ-волны в коаксиальной линии представляют собой радиальные прямые, т. е. из трех компонент электрического поля в цилиндрической системе координат r, φ и z в ТЕМ-волне есть только одна — радиальная компонента E_r, а у магнитного поля — только азимутальная компонента H_φ; электрическая и магнитная составляющие волны вблизи центрального проводника имеют бóльшую напряженность, так как силовые линии расположены гуще, чем у наружного проводника.

Типы волн, которые могут распространяться в волноводах, можно разделить на два больших класса. К первому относятся Н-волны, у которых вектор напряженности магнитного поля **H** наряду с поперечными имеет и продольную составляющую $\mathbf{H}_z$, а вектор электрического поля расположен полностью в плоскости поперечного сечения волновода, т. е. имеет только поперечные составляющие. Другой класс волн составляют Е-волны. У этих волн только вектор **E** имеет продольную составляющую, а вектор **H** полностью расположен в плоскости поперечного сечения волновода. Поэтому Н-волны называют еще поперечно-электрическими и обозначают ТЕ-волны. Другое название Е-волны — поперечные магнитные волны, которые обозначают как ТМ-волны. При больших поперечных размерах (много больших рабочей длины волны) в волноводе может распространяться множество типов как Н-волн, так и Е-волн, каждый из которых характеризуется своей структурой поля, скоростью распространения вдоль продольной оси волновода и величиной потерь. В отличие от ТЕМ-волны, Н- и Е-волны могут распространяться только при условии, когда поперечные размеры волновода превышают некоторое критическое значение.

Для обозначения каждого конкретного типа волны применяют два цифровых индекса, которые ставятся у буквы, обозначающей класс волны. Так, для волн в прямоугольном волноводе первая цифра характеризует изменение электромагнитного поля вдоль широкой стенки волновода (если изменения поля нет, т. е. оно постоянно, то индекс — нуль, изменение на полпериода — индекс 1, изменение на полный период — индекс 2 и т. д.). Второй индекс по этим же правилам характеризует изменение поля вдоль узкой стенки волновода. Например, простейшая магнитная волна обозначается символом H_{10} или TE_{10}. В такой волне вдоль широкой стенки волновода расположена одна ячейка поля, т. е. электрическое поле в поперечном сечении имеет один максимум. В направлении, параллельном узкой стенке, т. е. вдоль узкой стенки (иначе говоря, по высоте волновода), поле не меняется (рис. 3).

На рис. 4 показаны структуры полей волн H_{20}, H_{11} и E_{11} в волноводе прямоугольного поперечного сечения. Здесь важно отметить, что структуру электромагнитных полей любого типа волн в прямоугольном волноводе можно построить, зная структуру всего лишь трех типов простейших волн — H_{10}, H_{11} и E_{11}. Действительно, если сравнить структуру полей волн H_{20} и H_{10} на рис. 4 и 3, то можно отметить, что для волны H_{20} вдоль широкой стенки имеются два максимума интенсивности полей. Это по сути дела

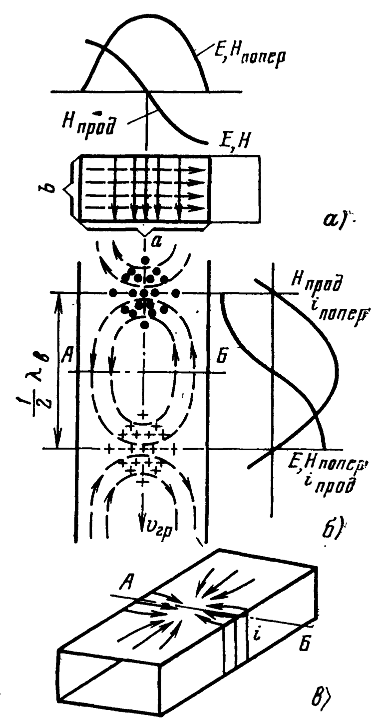


Рис. 3. Структура поля волны H_{10} в волноводе прямоугольного поперечного сечения:

а — в поперечном сечении волновода; *б* — вдоль продольной оси волновода; *в* — картина линий поверхностных токов на внутренних стенках волновода

картина поля волны H_{10}, повторенная дважды со сдвигом фаз в соседних ячейках поля на 180°.

Таким образом, структура полей любых H_{m0} ($m>1$) может быть построена на базе структуры поля только одной волны H_{10}. Аналогично для волн H_{mn} ($m\geqslant2$, $n\geqslant1$ или $m\geqslant1$ и $n\geqslant2$) надо знать структуру поля волны H_{11}, а для волны E_{mn} — структуру поля волны E_{11}. Отметим попутно, что волн типа E_{m0} и E_{0n} в прямоугольном волноводе не существует, так как для них граничные условия на металлических стенках выполняются только при нулевом значении продольных компонент электрического поля. Поэтому простейшей E волной является волна E_{11}.

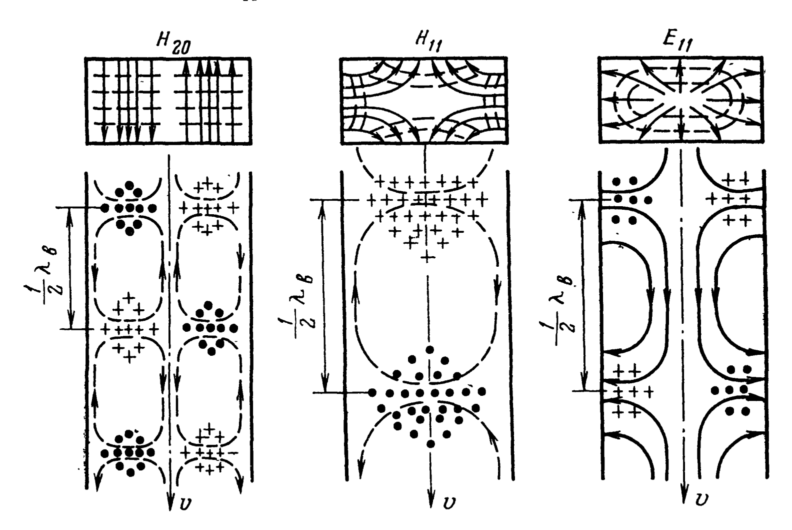


Рис. 4. Структура полей волн H_{20}, H_{11}, E_{11} в волноводе прямоугольного сечения

Сопоставим силовые линии магнитного поля на рис. 3,*б* с линиями высокочастотного тока, изображенными на рис. 3,*в*. Следует отметить, что токи в стенках любого волновода всегда направлены перпендикулярно магнитным силовым линиям в данной точке, а их поверхностная плотность численно равна напряженности магнитного поля в той же точке.

Так как в волне типа H_{10} вектор напряженности магнитного поля имеет продольную и поперечную составляющие (в плоскости, параллельной широким стенкам), то в поверхностном слое широкой стенки токи также имеют продольные и поперечные составляющие, причем максимальное значение продольного тока наблюдается в середине широкой стенки, а максимальное значение поперечного тока — у ее краев. По узкой стенке протекают только поперечные токи, а их значения определяются максимальным значением продольного магнитного поля (поперечное магнитное поле в плоскости узкой стенки отсутствует). В центре широкой стенки, в тех местах, где электрическое поле меняет свое направление (вблизи плоскостей *АБ* на рис. 3,*в*), линии тока как бы обрываются. Но это кажущийся разрыв: замкнутость линий тока обеспечивается за счет токов смещения, подобно тому как это происходит в цепи с конденсатором между его обкладками при работе на переменном токе.

Распределение токов в волноводах необходимо знать для правильного их конструирования и применения. Так, для волны H_{10} нужно обеспечить хороший электрический контакт в углах волновода, где текут поперечные токи. В середине же широкой стенки можно сделать узкую продольную щель. Она не нарушит работы волновода, так как параллельна продольным токам, а поперечные токи здесь равны нулю; излучение высокочастотной энергии через щель будет отсутствовать.

В волноводах круглого сечения также могут распространяться волны различных типов. Как и в прямоугольном волноводе, их обозначают с помощью символов Е и Н и индексов, состоящих из двух целых положительных чисел. Первый индекс указывает на число периодов изменения интенсивности поля по окружности, а второй — на число максимумов поля на протяжении радиуса волновода (а не диаметра). Для некоторых типов волн в круглом волноводе вдоль радиуса может укладываться нецелое число пространственных полупериодов поля. В этом случае для определения значения второго индекса производят округление до ближайшего целого числа в сторону увеличения.

На рис. 5 показаны структуры полей простейших типов волн в круглом волноводе. Если сопоставить рис. 3, 4 и 5, то можно заметить, что конфигурация полей волн H_{10} и E_{11} в волноводе прямоугольного поперечного сечения

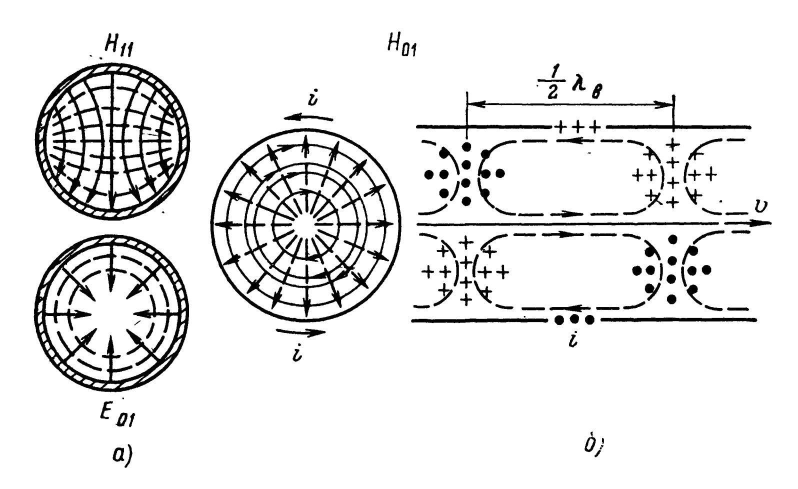


Рис. 5. Картина полей волн H_{11}, E_{01} и H_{01} в круглом волноводе: *а* — для волн H_{11} и E_{01} в поперечном сечении; *б* — для волны H_{01} в поперечном и продольном сечениях (i — направление кольцевых токов в стенках волновода)

«похожа» на конфигурацию полей волн H_{11} и E_{01} в волноводе круглого поперечного сечения. Обратим внимание, что индексы типов волн, «похожих» по структуре, в прямоугольном и круглом волноводах существенно различаются, причем простой закономерности перехода от индексов волн в прямоугольном волноводе к индексам волн в круглом здесь нет.

Волна H_{11} для круглого волновода является основным типом волны, как и волна H_{10} для прямоугольного волновода. Для волны E_{01} важно отметить осевую симметрию электромагнитного поля. Как и для любой другой волны типа Е, токи в стенках текут только в продольном направлении.

Для практического использования круглых волноводов большое значение имеет волна типа H_{01}, картина поля которой представлена на рис. 5,*б*. Электрические силовые линии у этой волны являются концентрическими окружностями, расположенными в плоскости поперечного сечения волновода. Магнитные силовые линии в виде овалов вытянуты вдоль волновода и расположены в плоскостях, проходящих через продольную ось волновода. Отличительной особенностью этой волны является наличие только кольцевых высокочастотных токов в стенках волновода. При этом значение тока при данной передаваемой мощности падает с ростом частоты. Это свойство является очень важным, так как при увеличении частоты сигнала потери энергии этой волны уменьшаются. Для всех других волн (кроме волн типа H_{0i}) потери энергии значительно увеличиваются с ростом частоты.

Поле волны H_{01}, как и волны E_{01}, обладает осевой симметрией, что позволяет применять волноводы с этими волнами во вращающихся соединениях, когда

нужно, например, соединить неподвижный волноводный тракт с вращающейся антенной.

Критическая длина волны и потери в волноводах. Критической длиной волны называется такая максимальная длина волны электромагнитных колебаний, измеренная в свободном пространстве, а не в волноводе, при которой прекращается распространение волны данного типа по волноводу.

Существует общая зависимость между длиной волны в волноводе $\lambda_в$, длиной волны в свободном пространстве λ и критической длиной волны $\lambda_{кр}$, справедливая для волноводов с любой формой поперечного сечения:

$$\lambda_в = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(f_{кр}/f)^2}} > \lambda.$$

При приближении рабочей длины волны λ к критической, как нетрудно видеть из этой формулы, длина волны в волноводе все более резко возрастает. С другой стороны, длина распространяющейся по волноводу волны $\lambda_в$ всегда больше длины волны в свободном пространстве. Если же $(\lambda/\lambda_{кр}) > 1$, то данный тип волны распространяться не может и для этого типа волны говорят, что волновод является «запредельным». Запредельные волноводы также находят практическое применение, например, для устройства специальных смотровых окон в виде металлических трубок малого диаметра, внутри которых ни один тип волны на данной частоте распространяться не может. Через подобные трубки можно наблюдать за процессами внутри волновода при передаче по нему больших СВЧ мощностей на распространяющемся типе волны.

При выводе формулы для $\lambda_в$ предполагалось, что внутри волновода воздух или вакуум. Если же волновод полностью заполнить диэлектриком, у которого относительные диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемости не равны единице, то в правой части выражения для $\lambda_в$ следует единицу заменить на произведение $\varepsilon\mu$.

Для того чтобы рассчитать значения $\lambda_в$ для любого волновода, необходимо знать критическую длину волны. Оказывается, что она зависит от формы и размеров поперечного сечения волновода, а также от типа волны.

Для любых типов волн H_{mn} и E_{mn} (m и n — целые положительные числа или нуль) в прямоугольном волноводе

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{m^2/a^2 + n^2/b^2}}.$$

Заполняя волновод полностью диэлектриком, можно увеличить критическую длину волны в $\varepsilon\mu$ раз, не меняя размеров волновода, или же при данной длине волны во столько же раз уменьшить его размеры.

Если проанализировать выражение для $\lambda_{кр}$, то можно сделать следующие важные практические выводы.

Наибольшим значением $\lambda_{кр}=2a$ обладает волна H_{10} в прямоугольном волноводе. Если рабочую длину волны выбрать из условия $a<\lambda<2a$ (обычно размер $b \leqslant a/2$), то при $a<\lambda<2a$ в волноводе может распространяться только один тип волны H_{10}. Поэтому волну H_{10} и называют «основной», а все остальные типы волн — «высшими». С другой стороны, при приближении λ к $\lambda_{кр}$ резко возрастают потери в волноводе, а минимум потерь имеет место, когда $a \approx 0{,}7\lambda$. Из этого условия обычно и выбирают размер широкой стенки волновода a.

Потери в волноводе прямоугольного сечения при данном материале стенок и рабочей длине волны зависят также и от размера узкой стенки b: чем меньше b, тем больше потери. Размер b обычно не делают больше $a/2$, так как иначе при $a<\lambda<2b$ возможно распространение по волноводу волны H_{01}, а распространение любых других типов волн в большинстве случаев крайне нежелательно.

Напомним, что величину потерь принято характеризовать коэффициентом поглощения, называемым еще коэффициентом затухания, или просто затуханием, который измеряется в неперах на 1 м длины волновода (Нп/м) или в децибелах на метр (дБ/м), причем 1 Нп=8,68 дБ. Другими словами, коэффи-

циент поглощения определяется величиной ослабления, выраженной в децибелах, на длине волновода, равной 1 м.

Фазовая и групповая скорости. Вернемся к формуле для длины волны в волноводе $\lambda_в$. По определению длина волны $\lambda_в$ — это такое расстояние вдоль продольной оси волновода, на протяжении которого фаза электромагнитного поля меняется на 360° или это расстояние, на которое перемещается любая фаза поля за время одного периода высокочастотных колебаний T. Так как $\lambda_в > \lambda$, то скорость перемещения фазы поля вдоль волновода с воздушным или вакуумным заполнением $v_ф$ должна быть больше скорости света c. Фазовая скорость $v_ф$ связана с $\lambda_в$ соотношением $v_ф = \lambda_в / T$. Учитывая, что $T = 1/f$, где f — частота электромагнитных колебаний, можно записать и такое удобное на практике выражение:

$$v_ф = \lambda_в f = \frac{1}{2\pi} \lambda_в \omega = \omega/\beta,$$

где $\beta = 2\pi/\lambda_в = \omega/v_ф$ — фазовая постоянная волны; ω — угловая частота.

В линиях передачи, в том числе и в волноводных, групповая скорость $v_{гр}$ равна скорости перемещения вдоль продольной оси волновода высокочастотной энергии, связанной с волной. В волноводах групповая скорость всегда меньше скорости света c. В линиях передачи с ТЕМ-волной фазовая и групповая скорости равны скорости света в среде, заполняющей линию. В случае волновода $v_ф v_{гр} = c^2/(\varepsilon\mu)$, т. е. произведение фазовой и групповой скоростей в волноводе равно квадрату скорости света в заполняющей волновод среде с относительной диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостями. Для воздуха или вакуума $\varepsilon = \mu = 1$.

Для возбуждения требуемого типа волны в волноводе необходимо подвести высокочастотную мощность, например, по коаксиальной линии, связанной с волноводом. Наружный проводник коаксиала присоединяется к стенке волновода, а центральный проводник заканчивается штырем, расположенным внутри волновода вблизи максимума электрического поля параллельно электрическим силовым линиям желаемого типа волны (это так называемая электрическая связь). При магнитной связи центральный проводник коаксиальной линии соединен с одним концом петли связи, другой конец которой замкнут на стенку волновода. Петля должна быть расположена вблизи максимума магнитного поля возбуждаемого типа волны так, чтобы магнитные силовые линии пронизывали плоскость петли.

Если электромагнитная волна распространяется по волноводу от генератора к нагрузке и полностью в ней поглощается, то говорят, что в волноводе установился режим бегущей волны. В этом случае коэффициент отражения от нагрузки равен нулю. Если вместо нагрузки замкнуть волновод накоротко, то вся мощность отразится обратно и в виде отраженной волны будет распространяться к генератору. В волноводе установится режим стоячей волны. Коэффициент отражения при этом равен единице. Для любого типа волны, имеющей длину $\lambda_в$, в волноводе на расстоянии $\lambda_в/4$ и далее через каждые полволны от короткозамыкателя в сторону генератора будут находиться максимумы электрического поля, равные удвоенной амплитуде поля в бегущей волне. Возле короткозамыкателя и через каждые $\lambda_в/2$ в сторону генератора — нули электрического поля (минимумы поля равны нулю).

В промежуточных случаях, когда от нагрузки отражается только часть падающей мощности, в волноводе тоже образуется стоячая волна, но в минимумах поле не равно нулю, а в максимумах оно больше амплитуды поля бегущей волны, но меньше его удвоенного значения.

Стоячую волну в волноводе принято характеризовать коэффициентом стоячей волны напряжения (сокращенно КСВН или $K_{ст}U$), равным отношению поля в максимуме к полю в минимуме стоячей волны. Для бегущей волны КСВН=1 (говорят, что «нагрузка идеально согласована с волноводом»). При полном отражении КСВН равен бесконечности.

Таким образом, КСВН может принимать значения от нуля до бесконечности. Хорошим согласованием считается, когда КСВН=1,05÷2,0. При КСВН=2 от нагрузки отражается только 11% падающей мощности.

ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

На СВЧ невозможно создать колебательные системы с сосредоточенными постоянными, обладающими хорошими резонансными свойствами, и поэтому здесь применяются особые колебательные системы, которые называются объемными или полыми резонаторами.

В качестве объемных резонаторов могут быть использованы, например, замкнутые с обоих концов металлическими стенками отрезки волноводов прямоугольного или круглого поперечных сечений длиной $l_{рез}$, равной целому числу полуволн в волноводе.

В объемных резонаторах, в отличие от обычных радиотехнических резонансных контуров, может быть возбуждено бесчисленное множество видов колебаний, каждый из которых характеризуется своим распределением электромагнитного поля внутри резонатора, своей резонансной частотой и рядом других параметров.

Обозначение типов колебаний, которые могут возбуждаться в полых резонаторах, похоже на принятые обозначения типов волн в волноводах. Добавляется только третий индекс p, например H_{mnp} или E_{mnp}. Индекс p указывает количество максимумов поля волн типов H_{mn} или E_{mn} на длине резонатора $l_{рез}$. Таким образом, $l_{рез}=p\lambda_в/2$, где p — целое положительное число.

В прямоугольных резонаторах наиболее часто используются колебания типа H_{101}, а в круглых цилиндрических — H_{011} или E_{010}. В последнем случае длину резонатора можно выбирать произвольно, так как она не связана с рабочей длиной волны (индекс p равен нулю). Но обычно ее выбирают порядка радиуса поперечного сечения волновода. Иногда такой резонатор называют радиальным.

В области длинных, средних и коротких радиоволн резонансный контур полностью характеризуется тремя основными параметрами: индуктивностью L, емкостью C и активным сопротивлением r (рис. 6). Все остальные параметры, например разонансная частота $\omega_0=1/\sqrt{LC}$, ненагруженная добротность $Q_0=\omega L/r$, являются производными, т. е. они выражаются через основные параметры L, C и r. Параметры L, C и r называются основными потому, что на низких частотах их можно измерить экспериментально, а совокупность их полностью характеризует свойства контура.

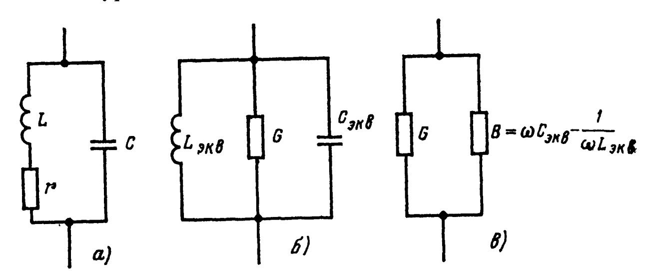


Рис. 6. Эквивалентные схемы:

а — параллельного контура низких частот; *б*, *в* — объемного резонатора

На СВЧ не только затруднительно измерить L, C и r, но и в ряде случаев вообще невозможно четко разделить в резонаторе области индуктивности и емкости, например при колебаниях типа H_{111} в прямоугольном резонаторе. Поэтому для полых резонаторов за основные принимают другие три параметра, которые можно измерить экспериментально.

Обычно в СВЧ диапазоне основными параметрами резонатора считают резонансную частоту ω_0 (или собственную резонансную длину волны $\lambda_0=c/f_0=2\pi c/\omega_0$), ненагруженную добротность Q_0 и активную проводимость G, являющуюся мерой активных потерь в резонаторе.

Зная ω_0, Q_0 и G, можно рассчитать значения эквивалентных индуктивности $L_{экв}$ и емкости $C_{экв}$ (рис. 6,*б*). В большинстве случаев каждый вид колебаний

в резонаторе характеризуется своими отличными от других видов колебаний значениями ω_0, Q_0, G, а также $L_{экв}$ и $C_{экв}$.

Таким образом, параметры эквивалентной схемы полого резонатора, изображенной на рис. 6,*б* или 6,*в*, действительны только для одного конкретного типа колебаний. Для другого типа колебаний значения параметров $L_{экв}$, $C_{экв}$ и G будут иными.

В качестве основных параметров объемных резонаторов можно выбрать и такие: резонансную частоту ω_0, характеристическое сопротивление $\rho = \sqrt{L_{экв}/C_{экв}}$ и величину, определяющую потери в резонаторе $\delta = 1/Q_0 = \rho G$.

Заметим, что резонансная частота ω_0 имеет размерность рад/с; проводимость G — 1/Ом=См; ρ выражается в омах, если $L_{экв}$ в генри, а $C_{экв}$ — в фарадах; δ, как и Q_0, являются безразмерными параметрами.

Характеристическое сопротивление ρ является важным параметром объемного резонатора. Конструкторы электронных приборов СВЧ стремятся так конструировать объемные резонаторы, чтобы значение ρ было как можно больше, т. е. при данном ω_0, а следовательно, и данном значении произведения $C_{экв}L_{экв}$ стремятся уменьшить емкость $C_{экв}$ и увеличить $L_{экв}$. При этом оказывается, что потери СВЧ энергии в резонаторе, идущие на нагрев металлических стенок, уменьшаются, а КПД электронных приборов увеличивается.

Собственная резонансная длина волны λ_0 определяется размерами резонатора и типом колебаний. Для прямоугольных резонаторов

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{p^2}{l^2_{рез}}}}.$$

Здесь a и b — размеры широкой и узкой стенок прямоугольного волновода; $l_{рез}$ — расстояние между металлическими пластинами, закорачивающими отрезок прямоугольного волновода; m, n и p — целые положительные числа. Одно из этих чисел может быть и нулем.

Объемным резонаторам присущи те же положительные качества, что и волноводам. Отсутствие потерь на излучение и потерь в диэлектрике, малая величина потерь в металлических стенках приводят к тому, что резонаторы в диапазоне СВЧ имеют высокую собственную добротность Q_0, достигающую сотен, тысяч, а иногда и десятков тысяч.

Ориентировочно собственную добротность объемного резонатора можно рассчитать как удвоенное отношение объема, в котором запасается энергия электромагнитного поля, к объему, в котором она расходуется, т. е. к объему, занимаемому поверхностным слоем во всех стенках резонатора:

$$Q_0 = 2\,V/(\Delta\,S),$$

где V — объем резонатора; Δ — толщина поверхностного слоя; S — площадь внутренней поверхности стенок резонатора. Для немагнитных материалов $\Delta = \frac{66\sqrt{\sigma_{меди}/\sigma}}{\sqrt{f\,(МГц)}}$, где Δ, мкм; f, МГц; $\sigma_{меди} = 5{,}8 \cdot 10^7$ См/м — удельная проводимость меди; σ — удельная проводимость рассматриваемого материала.

Если резонатор нагружен, т. е. связан с внешними высокочастотными трактами, то его добротность (в этом случае она называется нагруженной добротностью) уменьшается, но все же остается достаточно большой. Ненагруженная добротность Q_0 равна резонансной частоте ω_0, умноженной на отношение полной энергии, запасаемой в резонаторе, к мощности, рассеиваемой в резонаторе. Определение нагруженной добротности почти такое же, только вместо мощности, рассеиваемой в резонаторе, надо брать суммарную мощность, рассеиваемую в резонаторе и во всех нагрузках, подключенных к резонатору. Кроме того, на практике применяется еще понятие так называемой внешней добротности $Q_{внеш}$, которая равна резонансной частоте ω_0, умноженной на отношение высокочастотной энергии, накопленной в объеме резонатора, к мощности, рассеиваемой только в нагрузках. Соотношение меду Q_0, $Q_н$ и $Q_{внеш}$ следующее:

$$1/Q_н = 1/Q_0 + 1/Q_{внеш}.$$

Кроме рассмотренных резонаторов на основе волноводов существуют многие другие разновидности объемных резонаторов: коаксиальный, тороидальный, радиальный и др.

Коаксиальные резонаторы наиболее часто применяются в генераторах и усилителях на СВЧ триодах и тетродах, тороидальные — в пролетных и отражательных клистронах; магнетронные, как и следует из названия, — в магнетронах.

Применение резонаторов в радиотехнике и электронике СВЧ исключительно широко; они являются неотъемлемыми частями конструкции не только генераторов на металлокерамических триодах, клистронов, магнетронов, полупроводниковых генераторов и усилителей, но и находят применение в измерительной технике для создания волномеров, в промышленных и бытовых установках, где СВЧ энергия превращается в тепловую, и т. д.

ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

В ряде типов электронных СВЧ приборов, например в лампах бегущей волны, применяются специальные линии передачи СВЧ энергии, которые называются замедляющими системами (сокращенно — ЗС).

В ЗС обеспечивается замедление скорости распространения электромагнитных волн приблизительно до скорости электронного потока. В свою очередь синхронное движение волны и электронов позволяет получить усиление входного СВЧ сигнала.

Простейшим типом ЗС является спираль, навитая из проволоки обычно круглого поперечного сечения или из ленты (см. рис. 1,*д*).

Если считать, что вдоль проводника спирали волна распространяется со скоростью света c, то в направлении ее продольной оси скорость будет равна $v=c/m$. Замедление m электромагнитной волны в направлении продольной оси спирали z приблизительно равно отношению длины витка спирали к ее шагу:

$$m \approx \sqrt{(2\pi b)^2+h^2}/h = 1/\cos\psi,$$

где b — радиус спирали по центру поперечного сечения проволоки; h — шаг намотки; ψ — угол между направлением витков и продольной осью спирали z.

При больших замедлениях длину витка спирали можно считать равной $2\pi b$ и тогда при $h \ll 2\pi b$

$$m \approx 2\pi b/h = \operatorname{tg}\psi.$$

Важной особенностью спиральной ЗС являются слабая зависимость замедления от частоты (т. е. слабая дисперсия), а следовательно, и малое различие в значениях фазовой и групповой скоростей $v_ф$ и $v_{гр}$.

Обычно электронный поток, с которым взаимодействует электромагнитная волна, пропускают внутри спирали. При этом необходимо обеспечить не только замедление волны до скорости, близкой к скорости электронов в пучке, но и достаточную напряженность электрического поля в любой точке поперечного сечения внутри спирали. На рис. 7 показано распределение по поперечному сечению спирали продольной составляющей напряженности электрического поля,

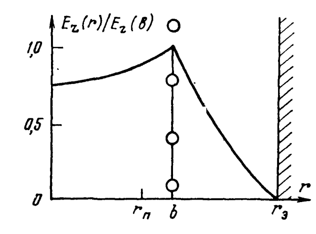


Рис. 7. Распределение продольной составляющей электрического поля $E_r(r)$ в спиральной ЗС по радиусу

с которой взаимодействуют электроны потока ($r_п$ — радиус границы электронного потока; $r_э$ — радиус металлического экрана, окружающего спираль; b — радиус спирали по центру поперечного сечения проволоки). Как видно из рисунка, электрическое поле максимально у поверхности проводника, а электрон-

ный поток занимает лишь часть области, в которой распространяется замедленная электромагнитная волна.

Эффективность взаимодействия пучка с волной будет тем выше, чем больше отношение энергии продольного электрического поля в области электронного пучка к энергии всего поля волны.

Для каждой конкретной геометрии спирали (т. е. значений b и h) существует определенный диапазон частот, в котором эффективность взаимодействия оказывается максимальной. При более высоких частотах неравномерность распределения E_z по радиусу возрастает, напряженность поля внутри пучка уменьшается. На более низких частотах эффективность взаимодействия уменьшается из-за того, что все большая часть энергии волны распространяется снаружи спирали.

Часто эффективность взаимодействия характеризуется сопротивлением связи (в омах)

$$R_{\text{с}} = \frac{E_z^2 v_{\text{ф}}^2}{2\,\omega^2 P},$$

где E_z — амплитуда продольной составляющей напряженности электрического поля на оси спирали; P — полный поток мощности замедленной волны через поперечное сечение спирали; ω — угловая частота.

Кроме спирали существуют и находят применение в СВЧ приборах и другие виды замедляющих систем: «гребенка», «цепочка связанных резонаторов», «кольцо-стержень», «встречные штыри» и т. д. (рис. 8). Все они являются периодическими ЗС. Взаимодействие электронного потока с электрическим полем

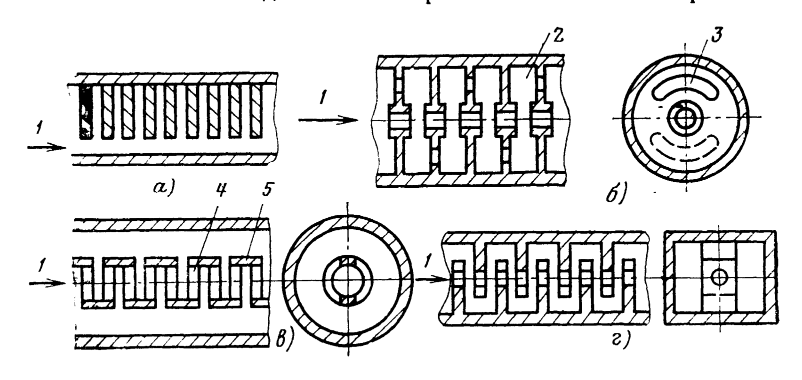


Рис. 8. Замедляющие системы с ярко выраженными пространственными гармониками:

а — гребенка; *б* — цепочка связанных резонаторов; *в* — кольцо-стержень; *г* — встречные штыри (*1* — ось симметрии электронного потока; *2* — резонатор; *3* — окно связи между резонаторами; *4* — кольцо; *5* — стержень)

замедленных волн в таких системах носит прерывистый (периодический) характер. При этом оказывается возможным обеспечение синхронизма движения электронов с волной при целом ряде скоростей электронов, в том числе и при движении электронов навстречу электромагнитной волне.

Рассмотрим в качестве примера ЗС типа «гребенка», около поверхности которой в направлении оси z распространяется замедленная электромагнитная волна с некоторой групповой скоростью $v_{\text{гр}}$ (рис. 9,*а*). Пусть длина замедленной волны $\lambda_з$ равна четырем периодам L замедляющей системы. Если зафиксировать на достаточно большом удалении от поверхности гребешков d_1 мгновенное распределение поля, например, продольную составляющую напряженности электрического поля E_z, то она окажется близкой к синусоидальной (кривая *1* на рис. 9,*б*). При перемещении волны в направлении оси z на период L это распределение поля, практически не меняясь, будет смещаться в том же направлении z с фазовой скоростью $v_{\text{ф}}$ (кривая *1'* на рис. 9,*в*).

Интенсивность поля в ЗС резко падает с удалением от поверхности, поэтому напряженность электрического поля в рассматриваемой нами области невелика. На практике электронный поток пропускают в непосредственной близости от поверхности гребешков, где картина распределения поля существенно отличается от синусоидальной.

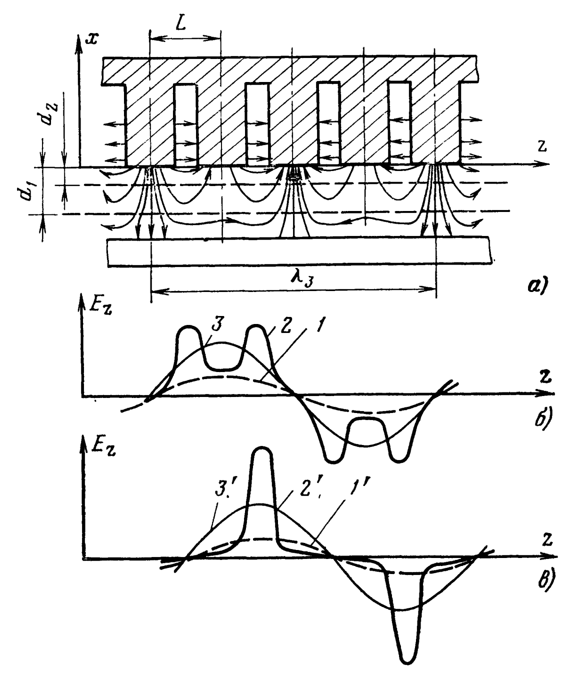


Рис. 9. Структура электрического поля замедленной волны, распространяющейся вдоль замедляющей системы типа «гребенка» при набеге фазы $\pi/2$ на период L

Действительно, так как на поверхности гребешков продольная составляющая электрического поля E_z должна быть равна нулю, то в кривой распределения E_z на участках, соответствующих гребешкам, возникают «провалы» (кривая *2* на рис. 9,*б*, на котором изображено распределение E_z на расстоянии d_2 от поверхности гребешков). Эти провалы тем больше, чем ближе к поверхности ЗС рассматривается распределение поля. И хотя при движении волны картина распределения поля по-прежнему смещается в направлении оси z, распределение поля в продольной плоскости вблизи гребешков будет существенно иным (кривая *2'* на рис. 9,*в*): провалы в распределении поля напротив гребешков остаются неподвижными.

В то же время можно заметить, что хотя при прохождении электрона под гребешком действующее на него в продольном направлении поле значительно слабее, чем при прохождении его около зазора между гребешками, в среднем на длине каждого пространственного периода ЗС L при скорости электронов, равной $v_ф$, на электрон действует постоянно либо ускоряющая, либо тормозящая сила. Другими словами, электрон находится в одной и той же фазе усредненного электромагнитного поля, распределение которого может быть представлено в виде синусоиды (кривые *3* и *3'* на рис. 9*б*, *в*).

При скоростях, отличных от $v_ф$, электроны будут попадать то в ускоряющее, то в тормозящее поле, т. е. не будет выполняться условие синхронизма. Однако, как было отмечено, условие синхронизма может быть обеспечено при ряде значений скоростей электронов, отличных от $v_ф$.

При этих скоростях за время прохождения электрона к соседнему зазору между гребешками (на расстояние L) волна перемещается на расстояние, кратное целому числу замедленных длин волн $\lambda_з$ плюс или минус период ЗС L (минус относится к случаю движения электронов навстречу волне, т. е. в направлении убывания координаты z на рис. 9,*а*). При этом, проходя каждый зазор, электроны будут попадать все время в одно и то же в среднем ускоряющее или тормозящее поле, т. е. будут в синхронизме с волной. Во время же пролета под гребешками на электроны действует в среднем поле противоположного знака. Но оно значительно меньше поля в зазоре. В результате можно считать, что электроны взаимодействуют с некоторым усредненным полем синусоидальной формы, которое принято называть пространственной гармоникой.

Фазовые скорости пространственных гармоник $v_п$ можно определить следующим образом.

Пусть электроны движутся со скоростью $v_п$, тогда за время t их прохождения от зазора к зазору гребенки ($t=L/v_п$) фаза синусоидальной огибающей поля переместится на расстояние $L+n\lambda_з$, где по определению $\lambda_з=2\pi v_ф/\omega$. Здесь n — целое положительное или отрицательное число. Следовательно, должно выполняться равенство $L/v_п=(L+\lambda_з)/v_ф$, откуда

$$v_п=\frac{v_ф}{1+n\lambda_з/L}.$$

Получающиеся по этой формуле значения скоростей $v_п$ называются фазовыми скоростями пространственных гармоник, которые могут быть как положительными, так и отрицательными.

При $n=0$ $v_0=v_ф$ и называется фазовой скоростью нулевой пространственной гармоники.

Еще раз подчеркнем, что фазовая скорость положительных гармоник совпадает по направлению, а для отрицательных — противоположна направлению групповой скорости $v_{гр}$. Термин «пространственные гармоники» введен по аналогии с частотными гармониками сложного сигнала.

Пространственные гармоники характеризуют процесс распространения волны по замедляющей системе. Скорости их однозначно определяются по приведенной формуле через $v_ф$, период системы L и номер гармоники n. Никакое разделение пространственных гармоник на независимо существующие волны, как это имеет место в случае частотных гармоник сложного сигнала, невозможно. Однако при теоретических расчетах формально к такому разделению все же прибегают. Групповая скорость всех пространственных гармоник одна и та же.

Эффективность взаимодействия электронов с волной при скоростях пространственных гармоник быстро уменьшается по мере удаления от поверхности ЗС, причем тем быстрее, чем выше номер гармоники.

На рис. 10 приведена типичная дисперсионная характеристика ЗС типа «гребенка», расположенной в прямоугольном волноводе (см. рис. 8). По оси ординат отложено замедление $c/v_п$, а по оси абсцисс — длина волны сигнала λ. На рис. 10 обозначены через λ_1 и λ_2 соответственно высокочастотная и низкочастотная границы полосы пропускания замедляющей системы; λ_2 практически совпадает с критической длиной волны волновода П-образного поперечного сечения с волной типа H_{10}; λ_1 соответствует длине волны сигнала, при которой длина замедленной волны $\lambda_з$ равна двум периодам гребенки $2L$. При этом отраженные от каждого гребешка элементарные волны складываются в фазе, так что про-

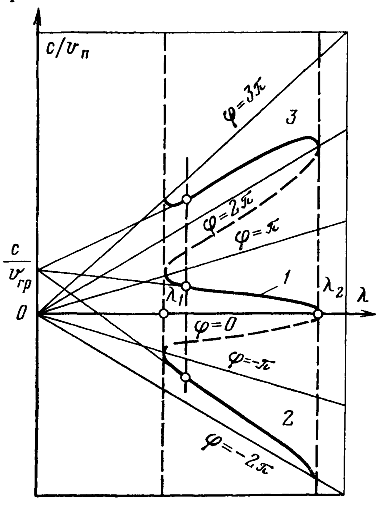


Рис. 10. Дисперсионные характеристики пространственных гармоник в ЗС типа «гребенка»

исходит полное отражение волны. Это происходит при $\lambda_1/4$, приблизительно равном высоте гребешков.

Кривая *1* на рис. 10 соответствует нулевой или, как ее еще называют, основной пространственной гармонике, кривая *2* — минус первой гармонике, а кривая *3* — плюс первой. Как видно из рисунка, нулевая гармоника обладает нормальной дисперсией (замедление падает с ростом λ), а минус первая, плюс первая и все остальные пространственные гармоники более высокого порядка имеют аномальную дисперсию. Прямые $\varphi = n\pi$ — линии постоянного набега фазы на один период гребенки L.

При любой длине волны сигнала в полосе пропускания ($\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$) касательные к дисперсионным кривым всех гармоник пересекаются в одной точке на оси ординат, удаленной от начала координат на расстояние $c/v_{гр}$. При λ_1 и λ_2 касательные вертикальны: нет пересечения их с осью ординат, а это означает, что при λ_1 и λ_2 групповая скорость $v_{гр} = 0$.

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В СТАТИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Статические, т. е. постоянные во времени, электрические поля используются в электронных приборах для ускорения и замедления движения электронов, изменения направления их движения и фокусировки потоков электронов. Такое поле обычно создается между электродами, когда к ним приложена разность потенциалов, т. е. подключен источник постоянного напряжения.

Статические магнитные поля используются для отклонения направления движения электронов и фокусировки электронных потоков. Они создаются с помощью соленоидов или постоянных магнитов, расположенных, как правило, вне вакуумной оболочки приборов.

В зависимости от соотношения направлений движения электрона и вектора поля **E** электрон ускоряется, тормозится или отклоняется от направления первоначального движения. Действие электрического поля на электрон характеризуется вектором силы $\mathbf{F}_e = e\mathbf{E}$, где e — заряд электрона, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а **E** — вектор напряженности электрического поля.

Под действием электрического поля меняется кинетическая энергия электрона, увеличиваясь или уменьшаясь на значение, равное произведению заряда электрона e на разность потенциалов между начальной и конечной точками рассматриваемой траектории U. Если начальная скорость электрона равна нулю, то его кинетическая энергия в данной точке пространства $mv^2/2$ (m — масса электрона — $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг) равна eU. Из этого равенства можно определить скорость электрона в метрах в секунду

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} U} \approx 6 \cdot 10^5 \sqrt{U},$$

где U измеряется в вольтах.

При движении электрона в статическом магнитном поле на него действует сила Лоренца, равная по абсолютной величине $F_м = evB \sin \varphi$. Здесь B — индукция магнитного поля, равная μH (μ — относительная магнитная проницаемость пространства); φ — угол между направлением скорости и индукции B. Направление силы Лоренца перпендикулярно как направлению скорости, так и направлению вектора **B** (рис. 11).

Так как сообщаемое электрону силой Лоренца ускорение всегда по направлению перпендикулярно вектору скорости, то абсолютная величина скорости электрона v и его кинетическая энергия не меняются; траектория движения становится не прямолинейной, а спиралеобразной. В частном случае, когда направление начальной скорости электрона перпендикулярно вектору **B**, шаг спиральной траектории становится равным нулю и электрон движется по окружности.

Траектория движения электрона становится значительно сложнее, если на него действуют одновременно как электрическое, так и магнитное статические поля. Наибольший практический интерес представляет случай, когда направления

векторов **E** и **H** перпендикулярны друг другу. Это так называемые «скрещенные» поля.

В зависимости от величины и направления начальной скорости влета электрона в пространство, занятое скрещенными электрическим и магнитным полями, траектории движения различны, но все они представляют собой того или иного вида трохоиду. Трохоиду вычерчивает в пространстве точка, жестко закрепленная на диске, который без проскальзывания с постоянной скоростью катится по плоскости (рис. 12).



Рис. 11. Направление силы Лоренца $F_м$ при движении электрона со скоростью v в однородном постоянном магнитном поле с индукцией B

Рис. 12. Трохоидальное в плоскости xz движение некоторых точек диска, катящегося по плоскости $x=0$

Здесь может быть четыре характерных случая: 1) центр диска (радиус рассматриваемой точки относительно центра диска $r=0$) перемещается по прямой *1* со скоростью перемещения центра диска $v_ц$; 2) если рассматриваемая точка находится на радиусе, меньшем радиуса диска R $(0<r<R)$, то она описывает трохоиду (кривая *2*). Скорость этой точки вдоль оси z меняется при каждом обороте диска от $v_{min}<v_ц$ до $v_{max}>v_ц$; 3) если $r=R$, мы имеем частный случай трохоиды — циклоиду (кривая *3*). Скорость точки в нижнем положении равна нулю, что следует из условия отсутствия проскальзывания, в верхнем положении скорость перемещения точки равна $2v_ц$; 4) если $r>R$, то рассматриваемая точка вычерчивает трохоиду (кривая *4*). Вблизи нижних участков направление продольной составляющей скорости становится отрицательным, и точка некоторое время движется в обратном направлении оси z (на длине, равной ширине петли), в верхнем положении скорость точки $v>2v_ц$.

Первый из рассмотренных случаев — прямолинейное движение электрона — возможен только тогда, когда направление начальной скорости в плоскости рисунка перпендикулярно электрическому и магнитному полям, а величина ее такова, что сила Лоренца точно равна по величине и противоположна по направлению силе воздействия электрического поля. Из этого условия следует, что $eE=evB$ или $v=E/B$.

Движение по циклоиде получается, в частности, тогда, когда начальная скорость электронов равна нулю, т. е. когда катод, эмиттирующий электроны, находится в плоскости качения диска на уровне нижней точки циклоиды. Такая же траектория может быть получена, если начальная скорость электрона $2v_ц=2E/B$ и направлена перпендикулярно электрическому и магнитному полям и при этом электрон оказывается введенным в поле в верхней точке циклоиды.

Во всех рассмотренных случаях средняя скорость движения электронов в продольном направлении (т. е. направлении, перпендикулярном постоянным электрическому и магнитному полям) $v_ц=E/B$.

ФОКУСИРОВКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ

В электронных приборах, особенно мощных, используются интенсивные электронные потоки, в которых в единице объема находится большое количество электронов. Так, например, в электронном пучке с током 200 мА, диаметром 1 мм при ускоряющем напряжении 10 кВ в каждом кубическом миллиметре имеется $2{,}7 \cdot 10^7$ электронов. Являясь элементарными частицами отрицательного заряда, электроны отталкиваются, вызывая тем самым расширение электронного потока. Во многих СВЧ приборах это недопустимо, так как в противном случае оказывается невозможным длительное взаимодействие электронов с электромагнитным полем. Поэтому в таких приборах необходимо осуществлять фокусировку электронного потока.

Под термином «фокусировка» здесь понимается не сведение потока в точку или пятно малого диаметра, как это имеет место в электронных микроскопах и телевизионных кинескопах, а поддержание поперечных размеров пучка в заданных пределах на всей длине взаимодействия с высокочастотным электромагнитным полем.

Существуют два основных способа фокусировки — магнитная и электростатическая. Магнитная фокусировка может быть осуществлена с помощью постоянного магнитного поля, ориентированного вдоль направления движения электронов и создаваемого постоянным магнитом или соленоидом, а также с помощью периодического магнитного поля, которое образуется системой магнитов с чередующейся полярностью вдоль оси пучка. Этот набор магнитов называется часто магнитной периодической фокусирующей системой, или сокращенно МПФС.

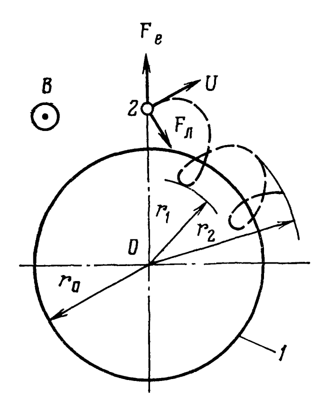


Рис. 13. Траектории движения электронов в поперечной плоскости при фокусировке продольным магнитным полем с индукцией B:

1 — начальный контур пучка радиуса r_0; 2 — электрон, вошедший в систему фокусировки на расстоянии r_2 от оси пучка

При фокусировке постоянным магнитным полем на электроны, отклоняющиеся от движения в продольном направлении, начинает действовать сила Лоренца, препятствующая расширению пучка (рис. 13). Такое отклонение от продольного движения вызывается как радиальной компонентой скорости электронов вследствие неидеальности формирования пучка в пушке, так и дефокусирующим действием пространственного заряда (сила F_e на рис. 13, направленная от центра пучка — точки 0).

В рассматриваемой системе траектория каждого из электронов представляет собой спираль, смещающуюся вокруг оси пучка. Проекция этой траектории на поперечной плоскости показана на рис. 13 штриховой линией. Радиусами r_1 и r_2 обозначены соответственно ближнее к оси пучка и наиболее удаленное положения граничных электронов. Частота вращения электронов в поперечной плоскости называется циклотронной частотой и определяется выражением $\omega_ц = eB/m$.

В результате оказывается, что пучок пульсирует с частотой $\omega_ц$, а его границы определяются пульсацией крайних электронов. Чем больше напряженность магнитного поля, тем меньше радиус спиральных траекторий, а следовательно, тем ближе максимальный диаметр пучка к своему первоначальному значению r_0.

Так как значительные пульсации электронных потоков в СВЧ приборах недопустимы, то для осуществления фокусировки требуется создавать магнитные поля с индукцией около десятых долей тесла (1000 Гс и более).

Формирование и фокусировка таких потоков осуществляются в однородном продольном магнитном поле, одинаковом по величине от катода до входа в коллектор (рис. 14). Необходимая для фокусировки напряженность магнитного поля может быть уменьшена, если разделить области формирования пучка и область фокусировки, т. е. вынести электронную пушку из магнитного поля.

В этом случае сформированный электронной пушкой поток пересекает на входе в фокусирующую систему область с радиальной компонентой магнитного поля. В результате каждый электрон приобретает угловую скорость в поперечной плоскости, равную половине циклотронной частоты $eB/2m$.

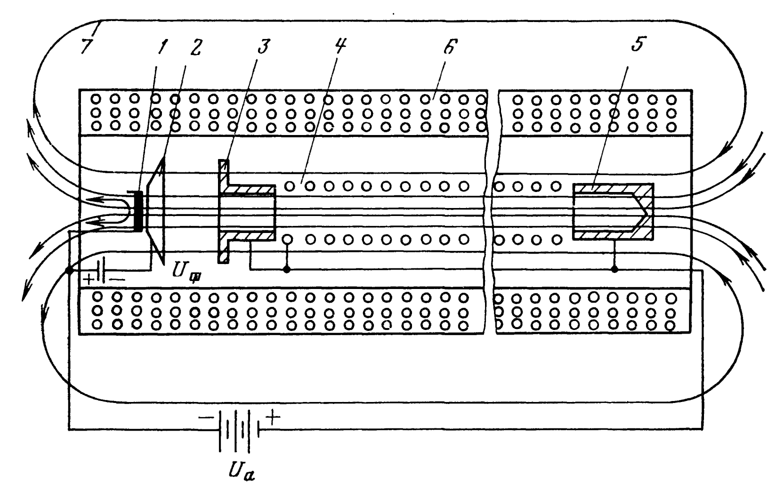


Рис. 14. Формирование и фокусировка электронного потока в продольном магнитном поле:

1 — катод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — анод; 4 — замедляющая система; 5 — коллектор; 6 — соленоид; 7 — силовые линии фокусирующего магнитного поля

При дальнейшем движении в продольном магнитном поле на электроны потока действуют направленные наружу силы пространственного заряда $F_е$ и центробежная сила $F_ц$.

Однако если направленная внутрь сила Лоренца $F_л$ оказывается равной сумме сил $F_е+F_ц$, то, следовательно, все электроны будут находиться в состоянии равновесия. Описанная фокусировка названа по имени предложившего ее ученого бриллюэновской. Она требует для своего осуществления относительно небольшой напряженности магнитного поля — практически минимальной из всех способов магнитной фокусировки.

Реверсная магнитная фокусировка. Существенным недостатком фокусирующих систем, которые создают однородное магнитное поле в области электронного пучка, являются их большая масса и габариты, а также потребление электрической энергии в случае использования соленоида. Размеры подобных систем могут быть уменьшены, если их составить из двух-трех соленоидов с противоположным направлением магнитного поля на оси (рис. 15). Это так называемая система с реверсом магнитного поля.

В реверсной магнитной фокусирующей системе по сравнению с обычным соленоидом существенно уменьшается напряженность магнитного поля рассеяния снаружи системы. Действительно, благодаря изменению направления магнитное поле быстро уменьшается снаружи от системы, причем тем сильнее, чем короче каждая секция. Именно поэтому поля рассеяния еще меньше в МПФС, а масса всех магнитов ее во много раз меньше массы соленоида или постоянного магнита, необходимого для создания эквивалентного фокусирующего поля.

Магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС). Действие МПФС можно свести к фокусирующему действию последовательности магнитных линз. Проходя радиальные магнитные поля у полюсных наконечников (рис. 16), траектории электронов пучка каждый раз закручиваются то в одну, то в другую сторону. Возникающее при этом вращательное движение вызы-

вает на участках с продольным магнитным полем появление силы Лоренца, направленной внутрь пучка. Если эта сила больше центробежной, то в пучке удается скомпенсировать расталкивающее действие пространственного заряда.

Электростатическая фокусировка может быть центробежной или периодической. Центробежно-электростатическая фокусировка (сокращенно ЦЭФ) имеет

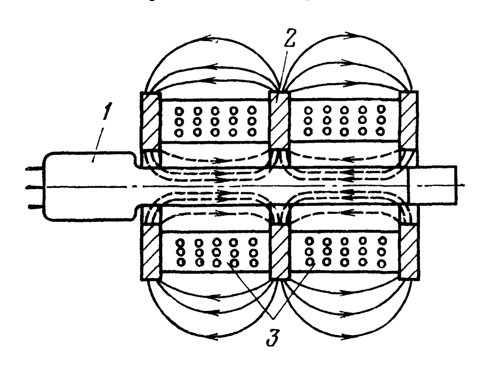


Рис. 15. Фокусировка электронного потока с реверсом магнитного поля:

1 — лампа бегущей волны; 2 — магнитный экран; 3 — соленоиды

место в электростатическом поле, создаваемом между двумя коаксиально расположенными электродами. Внутренний электрод обычно представляет собой тонкую натянутую, как струна, молибденовую или вольфрамовую проволоку, на которую подан более высокий потенциал, чем на внешний электрод. В качестве такого внешнего электрода обычно используется спиральная замедляющая система.

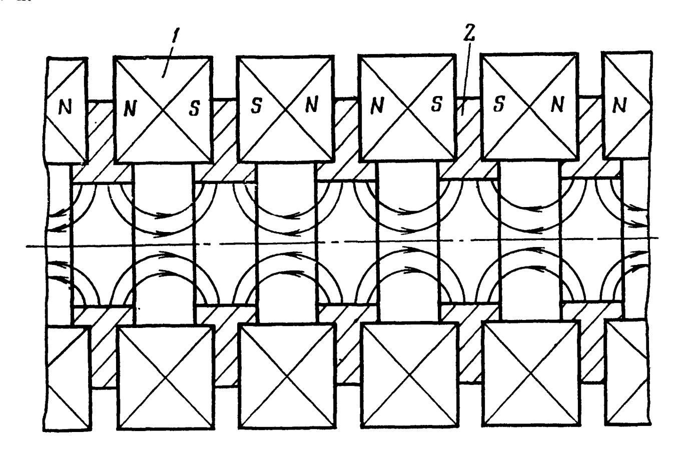


Рис. 16. Схема МПФС:

1 — кольцевой магнит; 2 — полюсный наконечник из магнитомягкой стали

В пространство между электродами вводится трубчатый электронный поток, в котором траектория движения каждого электрона — вытянутая в продольном направлении спираль. Таким образом, каждый электрон потока одновременно с движением вдоль продольной оси совершает вращательное движение вокруг центрального проводника.

Угловая скорость вращения и разность потенциалов между коаксиально расположенными электродами выбираются так, чтобы действующая на электрон центробежная сила, возникающая из-за его вращательного движения уравновешивалась направленной к центру силой притяжения электростатического поля.

Напряженность постоянного электрического поля между коаксиальными проводниками обратно пропорциональна радиусу, а центробежная сила, благодаря постоянству момента вращения, обратно пропорциональна кубу радиуса. Поэтому при отклонении электрона от равновесной траектории наружу сила электростатического поля становится больше центробежной, а при отклонении внутрь — меньше. Таким образом, разность этих сил всегда направлена в сторону равновесной траектории, что и обеспечивает фокусировку пучка.

Лампа бегущей волны с ЦЭФ отличается от ЛБВ с МПФС значительно меньшей массой (в несколько раз) при практически одинаковых высокочастотных параметрах.

При периодической электростатической фокусировке (ПЭФ) вблизи продольной оси электронного потока создается знакопеременное постоянное во времени электрическое поле. Такое поле возникает внутри последовательности металлических колец, потенциал которых периодически меняется около некоторого среднего значения (рис. 17,*а*), или внутри двухзаходной спирали, между проводниками которой подана разность потенциалов (рис. 17,*б*).

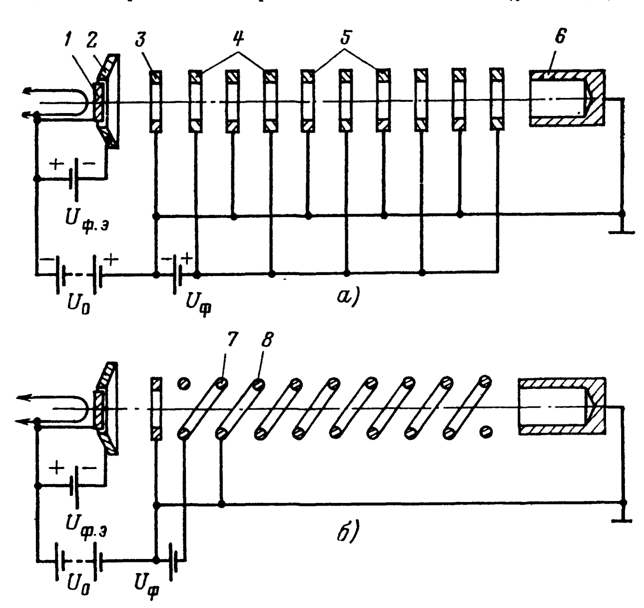


Рис. 17. Периодическая электростатическая фокусировка с помощью системы колец (*а*) и биспирали (*б*):

1 — катод; *2* — фокусирующий электрод пушки; *3* — анод; *4* — набор колец под потенциалом анода; *5* — набор колец под потенциалом $U_0+U_ф$; *6* — коллектор; *7* — спираль под потенциалом анода; *8* — спираль под потенциалом $U_0+U_ф$

В периодическом электростатическом поле на электроны последовательно действуют ускоряющие и тормозящие направленные наружу и внутрь силы. Однако благодаря тому, что направленная внутрь фокусирующая сила действует на электроны тогда, когда их продольная скорость минимальна, а направленная наружу расфокусирующая сила действует после того, как электроны ускорились, в целом электроны большее время находятся в фокусирующем поле.

Необходимая для фокусировки разность потенциалов довольно велика, что затрудняет практическую реализацию этого способа фокусировки.

Более удобным на практике оказался вариант электростатической фокусировки с большими по длине прибора периодами: на всей его длине имеется всего лишь три—пять периодов. Подобная фокусирующая система нашла прак-

тическое применение в пролетных усилительных многорезонаторных клистронах с электростатической фокусировкой. Осуществить эту систему фокусировки удалось благодаря тому, что в клистронах электронный пучок необходимо сжимать до относительно малого диаметра лишь в высокочастотных зазорах резонаторов, длина которых мала по сравнению со всей длиной прибора. На каждом из участков между высокочастотными зазорами резонаторов, называемых областями дрейфа (пространство дрейфа), можно допустить значительное (в несколько раз) расширение пучка (рис. 18).

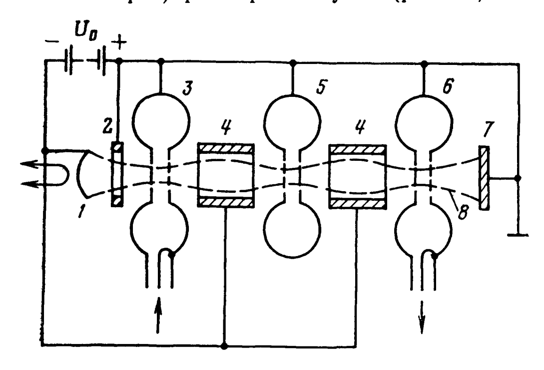


Рис. 18. Схема трехрезонаторного пролетного клистрона с электростатической фокусировкой:

1 — катод; **2 — анод; 3 — входной резонатор; 4 — электростатические линзы; 5 — промежуточный резонатор; 6 — выходной** резонатор; **7 — коллектор; 8 —** контур электронного потока

Это расширение электронного потока оказалось полезным для увеличения к.п.д. приборов, так как в пучке большего диаметра плотность пространственного заряда меньше, а следовательно, меньше силы расталкивания, препятствующие образованию плотных электронных сгустков.

Другим важным преимуществом подобного вида фокусировки оказалась возможность подачи потенциала катода на электростатические фокусирующие линзы. Тем самым устраняется необходимость в специальном источнике питания фокусирующей системы, который требуется при использовании биспирали в ЛБВ с периодической электростатической фокусировкой (см. рис. 17,*б*).

КОЛЛЕКТОРЫ ЭЛЕКТРОНОВ. РЕКУПЕРАЦИЯ

Коллекторами называют электроды приборов, на которые оседают отработанные в высокочастотной системе прибора электроны. В магнетронах, амплитронах и других им подобных приборах типа М коллекторы совмещены с высокочастотным блоком (замедляющей или резонаторной системой): отработанные электроны бомбардируют, например, анодный блок магнетрона. В приборах типа О коллекторы представляют собой отдельные узлы, обычно изолированные по постоянному току от высокочастотного блока с помощью металлокерамических изоляторов. Это сделано для того, чтобы можно было отдельно измерять ток электронов на коллектор и ток на высокочастотный блок прибора. Фокусирующую систему регулируют так, чтобы на высокочастотный блок приходилось не более нескольких процентов от полного катодного тока. Иначе прибор выйдет из строя вследствие перегрева в местах наибольшего оседания электронов.

В сверхмощных приборах, у которых масса коллектора равна нескольким десяткам килограмм и составляет 70—80% массы прибора, коллекторы не разъединяют по постоянному току. Тогда мощность из-за токооседания в пролетном канале измеряют по количеству (расходу) и разности температур охлаждающей жидкости на входе и выходе системы охлаждения высокочастотного блока, которая в этом случае должна иметь отдельный контур охлаждения.

В большинстве СВЧ приборов типа О в системе электропитания коллектор подсоединен к заземленному положительному полюсу источника анодного напряжения. Другими словами, и анод прибора, и его высокочастотный блок, и коллектор находятся под одним и тем же потенциалом.

Чтобы не допустить перегрева отдельных мест коллектора, предпринимают меры для равномерного рассеяния отработанного пучка по всей поверхности кол-

лектора, предназначенной для приема отработанных электронов. С этой целью в коллекторах устанавливают специальные магнитные экраны, предотвращающие проникание фокусирующего магнитного поля в коллектор.

Реально коллектор электронов располагают не сразу после вывода СВЧ энергии, а несколько отступя от него. Эта часть СВЧ прибора, расположенная между выводом высокочастотной энергии и собственно коллектором, называется предколлектором.

Система охлаждения коллекторов определяется уровнем средней мощности оседающих на них потоков электронов. Если эта мощность меньше 10 Вт, то

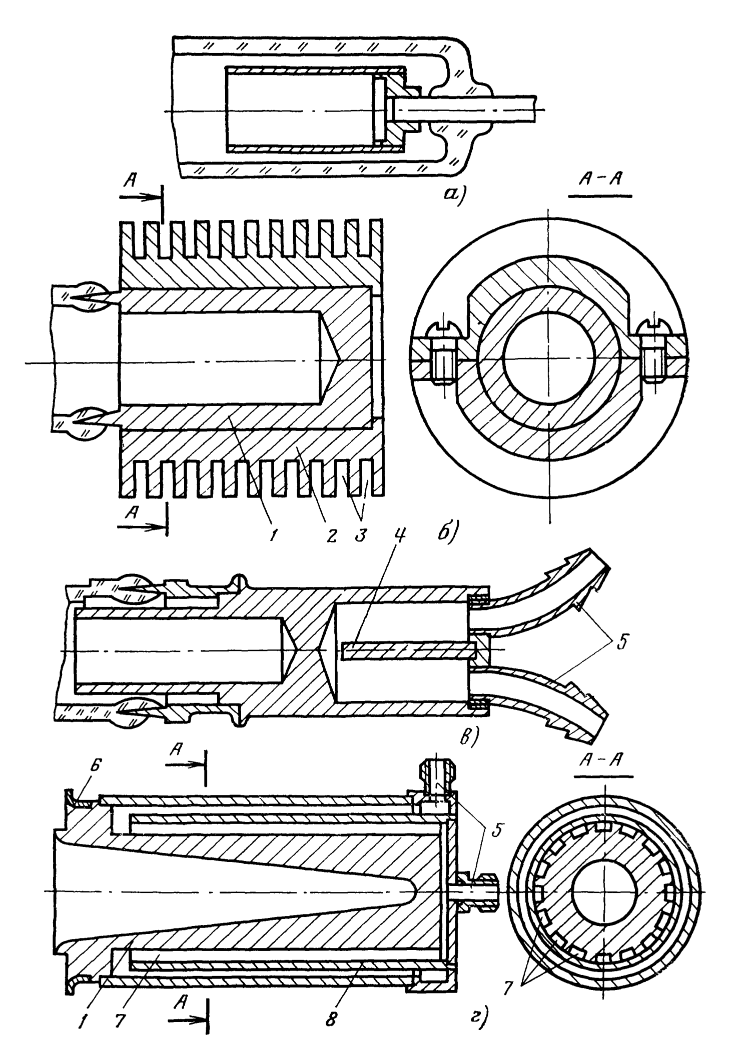


Рис. 19. Схемы конструкций коллектора приборов типа О на разный уровень рассеиваемой мощности:

1 — коллектор; *2* — радиатор; *3* — канавки для пропускания воздушного потока; *4* — пластина-перегородка; *5* — штуцеры для подачи охлаждающей жидкости; *6* — манжета для сварки коллектора с его изолятором; *7* — каналы для охлаждающей жидкости; *8* — металлическая рубашка (может быть магнитным экраном, если она изготовлена из малоуглеродистой стали 03-ВИ)

коллектор может и не иметь системы принудительного охлаждения. При мощности потока электронов от 10 до 500 Вт охлаждение может быть воздушным или жидкостным. При больших мощностях применяется, как правило, только жидкостное охлаждение.

Типичные конструкции коллекторов СВЧ приборов типа О схематически изображены на рис. 19. На рис. 19,*а* показан маломощный коллектор, на рис. 19,*б* — коллектор на среднюю рассеиваемую мощность (10—50 Вт) с воздушным охлаждением, на рис. 19,*в* — то же с жидкостным охлаждением и на рис. 19,*г* — коллектор на высокую рассеиваемую мощность (свыше 50 Вт).

Рекуперация энергии. Для увеличения к.п.д. СВЧ приборов в последнее время все чаще используется рекуперация, достигаемая путем уменьшения потенциала коллектора по отношению к потенциалу высокочастотного блока. В результате прошедшие область взаимодействия с электромагнитным полем отработанные электроны притормаживаются и отдают часть своей кинетической энергии в источник анодного питания прибора. Это позволяет не только повысить полный к.п.д. прибора, но и снизить тепловые нагрузки на коллектор.

Однако рекуперация — не простая техническая задача. Во-первых, отработанный электронный поток является многоскоростным. Поэтому, если слишком сильно понизить потенциал коллектора, то самые медленные электроны потока сначала остановятся, а затем будут ускорены в обратном направлении, т. е. в направлении от коллектора к пушке. На это ускорение затрачивается энергия источника анодного питания, и в результате вместо выигрыша в к.п.д. можно получить его снижение. Во-вторых, обратные электроны, если их становится много (более 2—3%), резко ухудшают высокочастотные характеристики прибора.

Особенности рекуперации рассмотрим на примере ЛБВ, так как именно для этого прибора выигрыш в к.п.д. благодаря применению рекуперации получается наиболее значительным.

Типичным значением электронного к.п.д. мощной ЛБВ является 25%; к.п.д., равный 38—40%, можно считать близким к предельному. Оценим возможности рекуперации для этих конкретных случаев. Оказывается, что во втором случае медленных электронов в отработанном потоке значительно больше, чем в первом, и относительный выигрыш в к.п.д. от рекуперации удается получить значительно меньшим. Дополнительное сравнительно небольшое увеличение к.п.д. может дать применение так называемой многоступенчатой рекуперации (см. далее).

На рис. 20 показаны границы металлических поверхностей коллектора с одноступенчатой рекуперацией и типичное распределение магнитного поля в

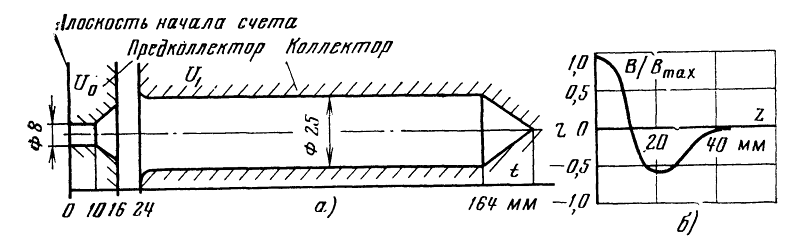


Рис. 20. Схема коллектора с одноступенчатой рекуперацией (*а*) и распределение продольной составляющей индукции постоянного магнитного поля на оси *z* (*б*)

нем. Нуль отсчета продольной длины (координаты *z*) совпадает с плоскостью центра вывода усиленного сигнала ЛБВ, который, в свою очередь, совпадает с последним максимумом магнитного поля регулярной части МПФС. Как видно, из рис. 20,*б*, имеется еще один уменьшенный пик фокусирующего магнитного поля противоположной полярности.

Скорость электронов в пространстве взаимодействия, как известно, определяется напряжением U_0, приложенным между катодом и находящимися под одним потенциалом анодом, замедляющей системой и предколлектором. Собственно коллектор (см. рис. 20) изолирован по постоянному току от предкол-

лектора, и на коллектор может быть подан потенциал относительно катода $U_1 \neq U_0$.

Теоретические и экспериментальные исследования коллектора с рекуперацией выявили интересные закономерности его работы. Пусть, для примера, потенциал коллектора понижен наполовину по сравнению с потенциалом замедляющей системы, т. е. $U_1/U_0=0{,}5$.

Магнитное поле, проникающее в коллектор (см. рис. 20,*б*), несколько сжимает пучок на выходе предколлектора, в результате в статическом режиме почти половина длины коллектора не воспринимает электронов.

Иное дело в динамическом режиме, т. е. при усилении высокочастотного сигнала. Здесь отработанный электронный поток является многоскоростным. Замедленные электроны (а их большинство) пройдут в коллектор только до того потенциального уровня электростатического поля, напряженность которого соответствует скорости электрона. Затем электроны повернут обратно и, набрав скорость, вплоть до значения, соответствующего напряжению U_0, осядут на предколлектор. Эти электроны уменьшат к.п.д., так как перед входом в коллектор их скорость была меньше, чем в момент оседания на предколлектор.

Повысить эффективность коллектора с рекуперацией можно несколькими способами. Прежде всего следует расширить пучок на входе в часть коллектора с пониженным потенциалом уменьшением фокусирующего магнитного поля последней магнитной фокусирующей линзы и приближением к оси стенок предколлектора. Кроме того, полезно увеличить протяженность участка с тормозящим полем, т. е. увеличить зазор между электродами. В результате токопрохождения на коллектор составило 62% вместо 38% в предыдущем случае.

Таким образом, можно сделать важный для практики вывод, что при одноступенчатой рекуперации нельзя значительно понижать потенциал коллектора: практически не удается сделать U_1/U_0 существенно меньше 0,5.

Многоступенчатая рекуперация. Как было отмечено, дополнительный выигрыш в к.п.д. можно получить, если в коллекторе применить два или более электродов с постепенно понижающимися потенциалами, причем самый дальний от пространства взаимодействия электрод может иметь потенциал, равный потенциалу катода ($U_п/U_0=0$). Анализ работы коллектора в случае одноступенчатой рекуперации довольно сложен. Эти сложности резко возрастают при двухступенчатой и тем более многоступенчатой рекуперации, в то время как реальный дополнительный выигрыш в к.п.д. с увеличением числа ступеней быстро снижается. Поэтому для получения в практических системах надежного и близкого к максимально возможному выигрышу по к.п.д. следует применять двухступенчатую рекуперацию при потенциале второй ступени, равной потенциалу катода. Только в этом случае источник питания прибора СВЧ остается прежним по конструкции, как и при одноступенчатой рекуперации, причем из-за дополнительного повышения к.п.д. его масса и габариты могут быть несколько уменьшены.

При двухступенчатой рекуперации к.п.д. дополнительно увеличивается за счет быстрых электронов отработанного пучка, влетающих в коллектор со скоростью $v > v_0 = 6 \cdot 10^5 \sqrt{U_0}$. Это объясняется тем, что, хотя доля ускоренных электронов сравнительно невелика, при торможении до потенциала катода во второй ступени кинетическая энергия их уменьшается на максимально возможное значение, определяемое полным анодным напряжением U_0. При электронном к.п.д. $\eta_e=(10\div15)$ % доля ускоренных электронов в отработанном потоке составляет 8—10% общего их числа, а при $\eta_e=(25\div35)$ % эта доля может возрасти до 15—20%.

Если предположить, что в коллектор входит 100% тока и попадание электрона на первую либо на вторую ступень его определяется только начальной энергией, то можно вычислить предельный, или идеальный, к.п.д. с рекуперацией. Расчеты показывают, что в идеальном случае при $\eta_e=25\%$ и $U_1/U_0=0{,}5$ к.п.д. повышается до 43% при одноступенчатой рекуперации и еще на 9%, т. е. до 52% при двухступенчатой рекуперации. При $\eta_e=38\%$ к.п.д. повышается соответственно до 55,5 и 63%, т. е. дополнительный выигрыш от двухступенчатой рекуперации только 7,5%. Более реальные подсчеты, в которых учитывается возврат части электронов в пролетный канал, в последнем случае дают более низкие результаты: 53% при одноступенчатой рекуперации и дополнительный выигрыш от применения двухступенчатой рекуперации состав-

ляет всего лишь 5%. Две ступени коллектора можно получить путем разделения его примерно на две изолированные равные части. Так как длина первой ступени более чем вдвое превышает ее диаметр, то электрические поля зазоров справа и слева от нее не влияют друг на друга.

В заключение можно сделать важный практический вывод, что при электронном к.п.д. не менее 25% применением двухступенчатой рекуперации в коллекторе с потенциалом второй ступени, равным потенциалу катода, можно увеличить к.п.д. СВЧ прибора, например мощной ЛБВ, до 45—47%.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ТРИОДЫ И ТЕТРОДЫ

Ограничения, возникающие при работе приемно-усилительных ламп на СВЧ. Особенности электромагнитных колебаний и волн в СВЧ диапазоне налагают целый ряд ограничений, затрудняющих использование приемно-усилительных ламп (триодов и тетродов) в этих диапазонах. Одно из них — увеличение по мере возрастания частоты индуктивного сопротивления X_L выводов ламп и емкостной проводимости B_C межэлектродных зазоров ($X_L=\omega L$, а $B_C=\omega C$). Это приводит к уменьшению напряжения входного сигнала на управляющей сетке и напряжения на полезной нагрузке, так как нагрузка шунтируется емкостной проводимостью зазора анод—катод.

Вследствие поверхностного эффекта с ростом частоты возрастают активные потери в выводах ламп. Увеличиваются также диэлектрические потери (например, в стекле баллона лампы в месте выводов) и потери на излучение.

Перечисленные ограничения не носят принципиального характера и в той или иной мере могут быть преодолены путем применения рациональных конструктивных решений. В частности, в разрабатываемых специально для работы в СВЧ диапазоне триодах и тетродах предусматривается непосредственное включение межэлектродных емкостей ламп в резонансные контуры схемы. Для уменьшения индуктивного и активного сопротивления выводов ламп их делают короткими из толстых или нескольких параллельно соединенных проводников или даже в виде сплошных дисков, покрытых серебром или золотом. Диэлектрические потери можно уменьшить заменой стекла на керамику с малыми высокочастотными потерями. Излучение можно устранить размещением лампы непосредственно внутри резонаторной системы (рис. 21). Более того, наилучшие результаты можно получить конструируя лампу вместе с системой резонаторов. Этот принцип конструирования впервые предложил и успешно применил на практике в 1938—1940 гг. Н. Д. Девятков (ныне академик). В приборах, созданных им совместно с Е. Н. Данильцевым и В. К. Хохловым, удалось свести к минимуму нерабочие поверхности электродов, что позволило увеличить собственную добротность резонаторов и повысить к.п.д. приборов.

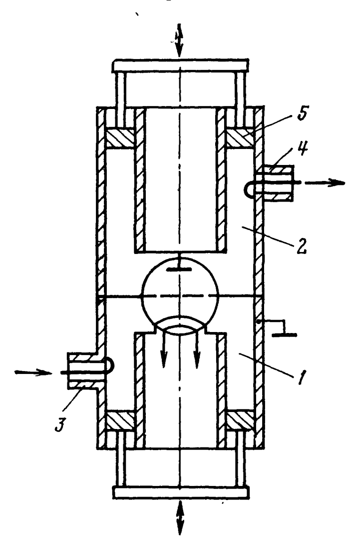


Рис. 21. Усилитель на СВЧ триоде по схеме с общей сеткой:

1 — катодно-сеточный коаксиальный резонатор; *2* — сеточно-анодный коаксиальный резонатор; *3* — вход СВЧ сигнала; *4* — выход усиленного сигнала; *5* — короткозамыкающие поршни перестройки резонаторов

Однако существуют принципиальные ограничения применения обычных приемно-усилительных ламп в СВЧ диапазоне. Это, прежде всего, возникающие в цепях электродов ламп наведенные токи, а во-вторых, конечное время пролета электронов между электродами лампы, соизмеримое с периодом высокочастотных колебаний.

Колебательные системы. Вместо контуров с индуктивностями в виде катушек и емкостей в виде конденсаторов в триодных генераторах и усили-

телях применяют либо коаксиальные резонаторы (на сантиметровых и коротких дециметровых волнах), либо колебательные системы из отрезков двухпроводных линий (на метровых и длинных дециметровых волнах). Резонаторы представляют собой короткозамкнутые отрезки коаксиальных линий, на противоположном от короткозамыкателя конце которых включен один из пролетных промежутков триода: катодно-сеточный или сеточно-анодный. Другими словами, эти промежутки лампы являются емкостной частью резонаторов, а индуктивными частями резонаторов служат короткозамкнутые отрезки коаксиальных линий.

Перестройка резонансной частоты ω_0 осуществляется перемещением короткозамыкающих поршней в коаксиальных линиях, т. е. изменением длины l.

Предельная частота. Это характерный параметр для СВЧ триодов. По мере увеличения частоты генерируемая мощность триода-генератора и коэффициент усиления каждого каскада усилителя на триодах постепенно уменьшаются, и, наконец, на некоторой частоте $f_{пред}$ генерируемая мощность уменьшится до нуля, а коэффициент усиления — до единицы. Значение $f_{пред}$ определяется пролетными явлениями при движении электронов между электродами лампы и высокочастотными потерями в ней.

Для увеличения $f_{пред}$ необходимо уменьшать внутриламповые емкости и индуктивности, уменьшать межэлектродные расстояния и увеличивать питающие напряжения. Последние две меры позволяют уменьшить угол пролета электронов θ, который определяется временем пролета электронами высокочастотного зазора t, соотнесенным с периодом T высокочастотных колебаний, т. е. $\theta=360°t/T$

В триодах СВЧ нельзя считать, что $\theta=0$, т. е. нельзя пренебрегать изменением высокочастотного напряжения на электродах лампы за время пролета электроном межэлектродного промежутка. Поэтому в современных СВЧ триодах стремятся уменьшить пролетные расстояния: например, у триода диапазона 8 см расстояние сетка—катод 0,15 мм.

Особенности электроники. Если в низкочастотной радиотехнике различают три класса работы триода — А, В, С, то на СВЧ наиболее характерными являются два класса — режим малых амплитуд, когда $U_m/U_{ср} \ll 1$, и режим больших амплитуд, когда U_m соизмеримо с $U_{ср}$ (U_m — амплитуда переменного напряжения, $U_{ср}$ — постоянное напряжение на электроде).

Триоды СВЧ можно рассматривать как сочетание двух диодов — катодно-сеточного и сеточно-анодного, разделенных управляющей сеткой. Скорости электронов в катодно-сеточном диоде значительно меньше, чем в сеточно-анодном, так как напряжение на сетке много меньше анодного. Поэтому угол пролета диода катод—сетка $\theta_{к.с} \gg \theta_{с.а}$, т. е. угла пролета сеточно-анодного диода. Триоды СВЧ удовлетворительно работают, когда $\theta_{к.с} < 270°$.

При анализе работы сеточно-анодного диода считают, что сетка как бы эмиттирует электроны с нулевыми начальными скоростями. Реально же в сеточно-анодный диод электроны влетают через сетку с малыми, но конечными скоростями. В режиме больших амплитуд между сеткой и катодом образуется группа электронов, которая один или даже несколько высокочастотных периодов колеблется между катодом и сеткой. Они влетают в пространство сетка—анод в неопределенное время, а не во время импульсов анодного тока, тем самым сильно снижая к.п.д. прибора.

Из-за большого значения $\theta_{к.с}$ импульс тока в сеточно-анодном пространстве отстает от высокочастотного напряжения, а из-за сравнительно большого значения $\theta_{с.а}$ этот импульс оказывается размытым по сравнению с импульсом в катодно-сеточном диоде. Этого размытия практически нет в СВЧ тетроде из-за ускорения всех электронов, попадающих в пространство экранная сетка — анод, напряжением на экранирующей сетке.

Схема с общей сеткой для триодов СВЧ генераторов и усилителей. Эта схема наиболее распространена (см. рис. 21), так как она конструктивно удобна: колебательная система состоит из анодно-сеточного и катодно-сеточного коаксиальных резонаторов, которые располагаются по разные стороны от плоскости сетки.

В схеме с общей сеткой по сравнению со схемами с общим анодом или с общим катодом минимальна паразитная внутренняя обратная связь, которую нельзя регулировать. Эта внутренняя обратная связь определяется индуктив-

ностью сетки и емкостью анод—катод $C_{а.к}$. Индуктивность сетки можно сделать минимально возможной, если вывод сетки металлический диск.

Из-за экранирующего действия сетки емкость $C_{а.к}$ много меньше емкости катод—сетка $C_{к.с}$ и емкости сетка—анод $C_{с.а}$. Поэтому в схеме с общей сеткой усилитель наименее склонен к самовозбуждению.

В генераторах на триодах по схеме с общей сеткой генерируемая частота $\omega_{ген}$ приблизительно равна резонансной частоте всей колебательной системы ω_0 (рис. 22,*а*). Для наиболее эффективной генерации необходима противофазность

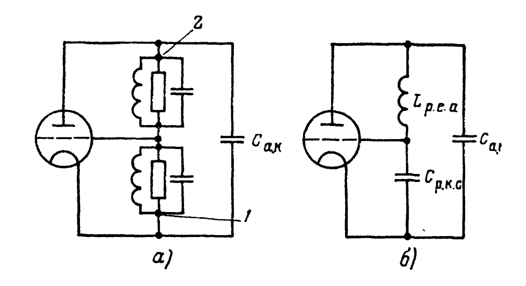


Рис. 22. Схема по высокой частоте генератора на СВЧ триоде:

а — с катодно-сеточным и анодно-сеточным резонаторами; *б* — эквивалентные сопротивления резонаторов

высокочастотных полей в пространствах катод—сетка и сетка—анод, а это имеет место, когда на генерируемой частоте сопротивление катодно-сеточного резонатора — емкостное $1/(\omega_0 C_{р.к.с})$, а анодно-сеточного — индуктивное. Таким образом, на генерируемой частоте высокочастотная эквивалентная схема упрощается, как это показано на рис. 22,*б*.

Как известно, резонансный контур имеет емкостное сопротивление, если его резонансная частота $\omega_{0к.с} < \omega_{ген} \approx \omega_0$.

Генерируемая частота в триодном СВЧ генераторе

$$\omega_{ген} \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{р.с.а}\dfrac{C_{р.к.с}C_{а.к}}{C_{р.к.с}+C_{а.к}}}} \approx \frac{1}{\sqrt{L_{р.с.а}C_{а.к}}}.$$

Последнее приблизительное равенство имеет место при $C_{р.к.с} \gg C_{а.к}$. Так как $C_{а.к}$ постоянно, перестраивать генерируемую частоту можно только изменением настройки анодно-сеточного контура.

Перестраивая катодно-сеточный контур, мы меняем отношение $C_{р.к.с}/C_{а.к}$, которое определяет величину сигнала на управляющей сетке. А это приводит к изменению генерируемой мощности, но почти не меняет частоту колебаний.

Таким образом, в триодных генераторах по схеме с общей сеткой удобно разделены регулировки выходной мощности и генерируемой частоты.

Типичные параметры СВЧ триодов. По конструкции и параметрам СВЧ триоды делятся на три группы.

1. *Маломощные триоды.* Их рабочая длина волны больше 3—7 см, выходная мощность — от 0,3 мВт до долей единицы ватт в непрерывном режиме и до единиц киловатт — в импульсном. Эти приборы в качестве входных усилителей приемников в последнее время заменяются лампами бегущей волны и полупроводниковыми СВЧ приборами.

2. *Триоды средней мощности* работают при длине волны больше 7—10 см и имеют выходную мощность от долей ватта до единиц ватт в непрерывном режиме и единицы — десятки киловатт — в импульсном.

3. *Мощные триоды*, как правило, имеют жидкостное охлаждение, работают при длине волны больше 40—50 см, имеют выходную мощность до 300 кВт в непрерывном режиме и до единиц мегаватт — в импульсном.

Главное достоинство СВЧ триодов — высокий к.п.д., доходящий до 60%, а главный недостаток — малое усиление, не превышающее обычно 10 дБ. Другой существенный недостаток — сравнительно малый срок службы, редко превышающий 1000 ч.

Триоды выпускаются или универсальными, или только генераторными. В генераторных внутри вакуумной оболочки имеются высокочастотные элементы связи между пространствами катод—сетка и сетка—анод.

В лабораторных измерительных генераторах и усилителях, а также в качестве преобразователей и умножителей частоты находят применение триоды малой и средней мощностей. В приемопередатчиках радиорелейных линий связи и в радионавигационных системах получили довольно широкое распространение триоды средней мощности. На них делают выходные каскады передатчиков.

Мощные импульсные триоды применяются в передатчиках радиолокационных станций.

Тетроды СВЧ. У тетродов СВЧ из-за наличия экранирующей сетки по сравнению с триодами существенно ослаблена связь между катодно-сеточным и анодно-сеточным резонаторами. Это уменьшает опасность самовозбуждения усилителей; к.п.д. тетродов выше, чем у триодов из-за уменьшения размытости импульсов анодного тока. На экранную сетку обычно подается полное анодное напряжение. Чтобы устранить высокочастотное напряжение между управляющей и экранной сетками, ставится блокировочный конденсатор, а усиливаемый сигнал подается на катод. В остальном же СВЧ тетроды в принципе работают так же, как и СВЧ триоды, включенные по схеме с общей сеткой.

Тетроды СВЧ предназначены для работы в длинноволновой части дециметрового и метрового диапазонов волн, т. е. для работы при $\lambda_{раб} > 40 \div 50$ см. Обычно их делают мощными.

Тетроды сверхбольшой мощности с внутривакуумными резонаторами называются резнатронами (что означает — резонаторный тетрод). Для них характерны $\lambda_{раб} = 40 \div 200$ см, выходная мощность в непрерывном режиме — десятки и сотни киловатт, полный к.п.д. 60—75%, но коэффициент усиления всего лишь 8—10 дБ. Это является их главным недостатком, который характерен для всех СВЧ электронных приборов с электростатическим управлением электронным потоком.

Важным достоинством СВЧ триодов и тетродов являются их сравнительно малые масса и габариты, что в значительной мере связано с отсутствием громоздких и дорогих систем фокусировки электронных потоков.

ПРОЛЕТНЫЕ И ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ КЛИСТРОНЫ

Модуляция электронного потока по скорости и плотности. Как было показано, электростатическое управление электронным потоком в СВЧ диапазоне затруднено, и для управления электронным потоком используется так называемое динамическое управление, которое заключается в модуляции пучка по скорости с последующим переходом модуляции по скорости в модуляцию по плотности. Модуляция по скорости осуществляется с помощью СВЧ поля, возбуждаемого в зазоре между двумя электродами (две сетки или металлические пластины с отверстиями). Направление напряженности электрического поля СВЧ колебаний выбирается продольным и совпадающим с направлением электронного потока, так что, проходя зазор, электроны тормозятся или ускоряются в зависимости от направления поля в данный момент времени.

Выходя из зазора, электроны попадают в пространство (так называемое пространство дрейфа), в котором нет электрического поля, и скорость их, если не учитывать расталкивающего действия пространственного заряда, не меняется. В то же время ускоренные в зазоре электроны догоняют приторможенные, в результате чего в пространстве дрейфа формируются сгустки, которые становятся все более плотными по мере удаления от зазора. Если плотность электронного потока невелика и расталкивающим действием зарядов можно пренебречь, то на расстоянии, называемом фокусным, ускоренные электроны догоняют заторможенные. Далее протяженность сгустков в направлении продольной оси потока начинает постепенно увеличиваться. Если же плотность тока достаточно велика, то силы расталкивания между электронами замедляют формирование сгустков, что приводит к их расфокусировке на расстоянии, меньшем фокусного.

Так модуляция по скорости в зазоре переходит в модуляцию по плотности в пространстве дрейфа.

Если расположить в пространстве дрейфа анод лампы, то, вследствие модуляции пучка по плотности, количество электронов, попадающих на анод, со временем будет меняться. Однако переменная составляющая тока в цепи анода фактически отсутствует. Это объясняется тем, что вследствие большого значения угла пролета наведенный на аноде ток усредняется. Поэтому, для того чтобы получить в нагрузке переменный ток, необходимо включать ее не в цепь анод—катод, как это делается в лампах с электростатическим управлением, а в промежуток зазора, аналогичного тому, который используется для модуляции по скорости. Этот зазор должен быть расположен на расстоянии, где еще не началась разгруппировка сгустков.

В цепи зазора возбуждается наведенный ток, амплитуда которого, если пренебречь оседанием электронов на электроды зазора, может достигать амплитуды переменной составляющей конвекционного тока, при этом фаза наведенного тока совпадает с фазой конвекционного. Действительно, в момент максимальной плотности заряда в зазоре максимальна величина заряда, наведенного на электродах. Если сопротивление зазора активное, то падение напряжения, вызванное прохождением наведенного тока, возбуждает в зазоре переменное поле, тормозяшее электронные сгустки и ускоряющее электроны, проходящие зазор в период минимальной плотности пространственного заряда. Так как число заторможенных электронов оказывается больше, то в целом кинетическая энергия электронного потока уменьшается, преобразуясь в энергию электромагнитных колебаний, возбуждаемых во втором зазоре. Максимальная разность потенциала в зазоре равна произведению амплитуды наведенного тока на сопротивление и не должна превышать напряжение, при котором электроны полностью затормаживаются.

В отличие от лампы с электростатическим управлением, в расмотренном случае время прохождения электронов от катода до коллектора, от одного зазора к другому может существенно превышать период колебаний. Однако время прохождения самих зазоров должно быть меньше периода. Чем меньше ширина зазора, тем эффективнее модулируется пучок по скорости и эффективнее отбирается энергия у промодулированного пучка. По мере же увеличения времени прохождения электронов в зазоре действующее на них поле усредняется и эффективность взаимодействия уменьшается. Уменьшить время пролета можно, увеличив начальную скорость электронов. Чем больше начальная скорость электронов, тем меньше относительная ширина зазора. В то же время чем выше частота колебаний, тем меньше период и тем шире зазор. Поэтому ширину зазора удобно характеризовать углом пролета $\theta=\omega d/v_0$, где d — ширина зазора; ω — угловая частота; v_0 — постоянная составляющая скорости электронов. Уменьшение эффективности модуляции потока или эффективности отбора энергии от промодулированного потока характеризуется так называемым коэффициентом взаимодействия M. В случае плоского зазора $M=\frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2}$

В СВЧ приборах начальная скорость электронов и, следовательно, напряжение, до которого они ускоряются, выбираются, как отмечалось, большими. Поэтому амплитуда СВЧ напряжения, подаваемого на модулирующий зазор, т. е. амплитуда напряжения усиливаемого сигнала в зазоре, как правило, мала по сравнению с ускоряющим напряжением ($U_1 \ll U_0$). Отсюда следует, что изменение скорости электронов в зазоре невелико по сравнению с постоянной составляющей, а время их нахождения в зазоре приблизительно одно и то же в любой момент времени.

Двухрезонаторный прямопролетный клистрон. Описанные способы модуляции по скорости и отбора энергии используются в так называемом пролетном клистроне, который предназначен для усиления СВЧ колебаний. Принцип действия пролетного клистрона поясняется рис. 23.

Формируемый с помощью электронной пушки пучок, ускоренный до напряжения U_0, вводится в зазор входного резонатора, на который подается усиливаемый сигнал. Модуляция электронов по скорости переходит в пространстве дрейфа в модуляцию по плотности, в результате чего в цепи выходного резонатора возбуждается наведенный ток. Когда ток проходит через полезную нагрузку, на ней выделяется усиленный сигнал. Вышедший из выходного зазора электронный поток попадает на коллектор. Естественно, что усиление тем больше, чем больше наведенный ток и активное сопротивление нагрузки. Значение

наведенного тока пропорционально переменной составляющей конвекционного тока, поэтому усиление до определенного предела растет с ростом абсолютного значения тока и расстояния между зазорами. Переменное напряжение на зазоре выходного резонатора не превышает ускоряющего напряжения U_0, поэтому проводимость нагрузки, с учетом активной проводимости резонатора, не долж-

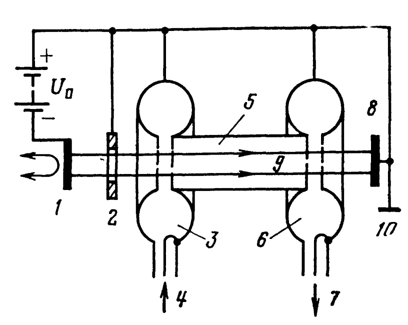


Рис. 23. Схема двухрезонаторного прямопролетного усилительного клистрона:

1 — катод; *2* — анод электронной пушки; *3* — входной резонатор; *4* — вход СВЧ сигнала; *5* — трубка дрейфа; *6* — выходной резонатор; *7* — выход усиленного СВЧ сигнала; *8* — коллектор; *9* — электронный поток; *10* — заземление

на превышать отношение I_0/U_0. Однако с увеличением тока плотность пространственного заряда растет и максимальное расстояние между резонаторами, при котором еще не происходит разгруппировки сгустков, уменьшается, что ограничивает усиление в описанном двухрезонаторном клистроне значением 10—15 дБ. Увеличить усиление можно, добавляя новые резонаторы (рис. 24) и доводя их число до трех-четырех и более.

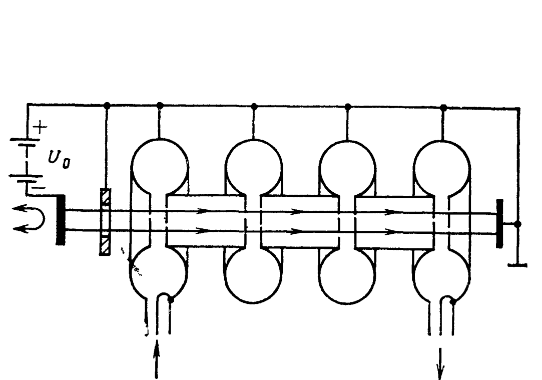


Рис. 24. Схема четырехрезонаторного пролетного клистрона

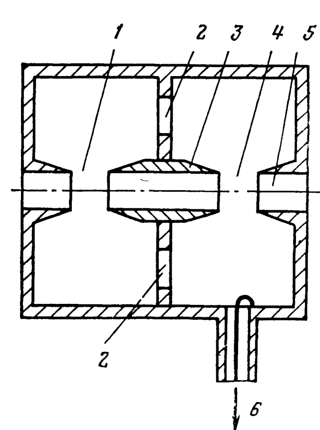


Рис. 25. Схема выходного двухзазорного резонатора широкополосного усилительного клистрона:

1 — первый зазор; *2* — отверстия связи между резонаторами в общей стенке; *3* — трубка дрейфа; *4* — второй зазор; *5* — пролетный канал; *6* — выход СВЧ мощности

Многорезонаторные усилительные клистроны. Возбуждаемый в промежуточных резонаторах высокочастотный ток создает в зазорах этих резонаторов напряжение, увеличивающее модуляцию пучка по скорости. При этом вследствие высокой добротности промежуточных резонаторов переменное напряжение на зазорах промежуточных резонаторов существенно превышает напряжение

сигнала на входном резонаторе, благодаря чему каждый последующий резонатор позволяет увеличить усиление приблизительно на 15—20 дБ.

Недостаток пролетных клистронов — относительно узкая полоса усиления. Полоса усиления может быть расширена расстройкой промежуточных резонаторов. При этом уменьшается амплитуда колебаний, возбуждаемых в промежуточных резонаторах, резонансная частота которых отличается от частоты сигнала. В результате коэффициент усиления клистрона, определяемый этими резонаторами, снижается. Поэтому необходимый коэффициент усиления клистрона может быть получен за счет увеличения числа промежуточных резонаторов. Вследствие того что выходной резонатор связан с нагрузкой, нагруженная добротность его существенно меньше добротности входного и промежуточных резонаторов и он в меньшей степени ограничивает полосу усиления. Тем не менее в многорезонаторном клистроне с расстроенными промежуточными резонаторами именно выходной резонатор препятствует существенному расширению полосы. Ширина полосы оказывается тем больше, чем меньше нагруженная добротность выходного резонатора, однако, увеличивая нагрузку, мы уменьшаем амплитуду поля в резонаторе и тем самым, отбираемую от сгруппированного потока энергию.

Как уже говорилось, максимальный отбор энергии от пучка осуществляется, когда проводимость резонатора с учетом нагрузки равна проводимости пучка I_0/U_0. Большее отношение I_0/U_0 и, следовательно, большую проводимость можно допустить в мощных клистронах, в частности в многолучевых, поэтому полоса усиления мощных клистронов может быть больше полосы усиления клистронов малой мощности.

Повысить эффективность отбора энергии из выходного резонатора, причем в более широкой полосе частот, удается путем применения так называемых двухзазорных резонаторов (рис. 25). В этих резонаторах сгруппированный электронный пучок отдает свою энергию в первом зазоре, далее проходит короткий участок дрейфа, и затем во втором зазоре отдают энергию те электроны, которые в первом зазоре не полностью отдали свою энергию высокочастотному полю резонатора, например проходили зазор при нулевом значении переменного электрического поля.

Типичные параметры прямопролетных клистронов. Обычно прямопролетные клистроны строят на большую мощность и применяют в выходных каскадах мощных передатчиков и генераторов с независимым возбуждением.

С помощью прямопролетных клистронов в настоящее время достигнуты наибольшие мощности в непрерывном и импульсном режимах. Так, на одном из типов клистронов трехсантиметрового диапазона в непрерывном режиме получена мощность 250 кВт (а по некоторым сведениям и 1 МВт). Клистрон Тв 2091 (США) обеспечивает на выходе импульсную мощность 30 МВт в полосе частот 10% по уровню 1 дБ. Разрабатывается многолучевой клистрон с импульсной мощностью 100 МВт и средней мощностью 1 МВт.

В многолучевых клистронах при условии сохранения постоянного к. п. д. чем больше ток в электронном потоке, тем при том же ускоряющем напряжении больше мощность потока, а следовательно, и выходная СВЧ мощность. Но увеличить в несколько раз ток в пучке при неизменном его диаметре не удается, так как это потребовало бы резкого усложнения фокусирующей системы. Многолучевые приборы открывают один из перспективных путей преодоления этих трудностей: через высокочастотные зазоры резонаторов пропускают несколько (практически 6, 9 или 18) параллельных лучей такого диаметра и с таким же током, как и в однолучевом приборе. Каждый луч проходит по своему пролетному каналу, а система фокусировки для них — одна, общая, и практически такая же, как и в однолучевом пролетном клистроне.

Общий ток в многолучевом клистроне может быть, следовательно, увеличен во столько раз, сколько в этом приборе лучей, во столько же раз возрастает и первеанс электронного потока. Первеанс — это отношение выраженного в амперах рабочего тока прибора, например ЛБВ или клистрона, к величине анодного напряжения (в вольтах, в степени 3/2). А это кроме увеличения выходной мощности позволяет расширить полосу усиливаемых частот (даже до 12—15%).

Однако пропорционального числу лучей увеличения выходных параметров многолучевого клистрона по сравнению с однолучевым не получается, так как

в многолучевых приборах в резонаторах неизбежно приходится увеличивать емкость высокочастотных зазоров, поскольку поперечное сечение нескольких лучей в несколько раз больше, чем одного луча. А это снижает характеристическое сопротивление резонаторов, а следовательно, и их к. п. д. Кроме того, существенно возрастают трудности формирования электронных потоков в многолучевых пушках по сравнению с однолучевыми. Поэтому многолучевые приборы не могут вытеснить однолучевые. Эти два направления конструирования развиваются параллельно, взаимно дополняя друг друга.

Физика работы многорезонаторных пролетных клистронов, особенности их конструкции, а также возможность создания многолучевых приборов пока еще не ставят принципиальных ограничений в получении требуемых мощностей. Поэтому наибольшее внимание уделяется повышению их к. п. д., увеличению полосы усиления. Улучшение группировки пучка с помощью промежуточных резонаторов, настроенных на вторую гармонику, а также применение одноступенчатой и многоступенчатой рекуперации позволили поднять общий к. п. д. до 75% и более.

Хотя полоса усиления мощных клистронов достигает 10% (при большом первеансе пучка нагруженная добротность выходного резонатора может быть около десяти), еще большую полосу получают, заменяя выходной резонатор участком замедляющей системы. Такой прибор, названный твистроном, обеспечивает к. п. д. и полосу усиления, большие, чем у ЛБВ той же мощности. Известны твистроны диапазона волн 10 см с импульсной мощностью 5 МВт при полосе усиления 15%.

Отражательные клистроны. Это СВЧ приборы, в которых используется принцип кратковременного взаимодействия поля с электронным потоком. Отражательный клистрон состоит из электронной пушки, резонатора с сетками или отверстиями для пучка и электрода, называемого отражателем. На резонатор подается положительный относительно катода потенциал, а на отражатель — отрицательный. Формируемый электронной пушкой пучок проходит зазор резонатора в прямом направлении, а затем, поворачиваясь в тормозящем поле отражателя, — в обратном направлении. Затормаживаясь и отражаясь от катода, электроны оседают на поверхности резонатора. Хотя проходящий в прямом направлении поток считается однородным, скорость электронов и плотность пространственного заряда вследствие теплового разброса скоростей и неоднородности эмиссии катода хаотически меняются во времени (пучок «шумит»), т. е. на постоянную составляющую накладывается, хотя и малый, шумовой ток. Такой же шумовой ток наводится и в резонаторе, возбуждая на резонансной частоте резонатора переменное напряжение.

Это напряжение вызывает модуляцию пучка по скорости. Промодулированный по скорости пучок, выходя из резонатора, попадает в тормозящее поле отражателя. Так как ускоренные в зазоре резонатора электроны пролетают дальше и возвращаются в зазор позже, чем приторможенные, обратный поток электронов оказывается промодулированным по плотности и наводит в резонаторе ток на частоте модуляции, т. е. снова на резонансной частоте. Если время пролета электронов в прямом и обратном направлениях таково, что возбуждаемое обратным потоком поле совпадает по фазе с полем, вызвавшим модуляцию электронов по скорости, то процесс модуляции усиливается и в приборе возникают непрерывные колебания.

Таким образом, отражательный клистрон позволяет осуществить генерацию СВЧ колебаний. Время пролета электронов можно регулировать, изменяя напряжение на отражателе, при этом в небольших пределах меняется частота генерации, т. е. осуществляется электронная перестройка частоты, изменяется и выходная мощность. Если сгустки возвращающегося в резонатор потока приходят в зазор в момент максимального тормозящего поля, то возбуждаемое сгустками поле совпадает по фазе и складывается с установившимися в резонаторе колебаниями. При запаздывании сгустков возбуждаемое ими поле не совпадает с полем резонатора по фазе, в результате чего суммарное поле достигает своего максимального значения несколько позже. Сдвигается при этом и процесс группировки прямого электронного потока. И так каждый раз на каждом периоде запаздывание возвращающихся сгустков приводит к затягиванию периода колебаний и, следовательно, к уменьшению частоты генерации относительно резонансной. То же самое, но с уменьшением периода происходит при

преждевременном возвращении сгустков в зазор. В том и другом случаях напряженность поля в резонаторе уменьшается, и при сильном отклонении времени от оптимального генерация срывается. На практике электронная перестройка частоты осуществляется лишь в небольших пределах, а изменение частоты в широких пределах осуществляется перестройкой резонансной частоты резонатора (механическая перестройка частоты).

Так как в отражательном клистроне сгустки формируются около электронов, прошедших резонатор в прямом направлении в момент изменения поля от ускоряющего к тормозящему, оптимальный по фазе момент возвращения сгустков такой, когда поле является ускоряющим для прямого потока (тормозящим для обратного). При этом генерация может осуществляться при временах пролета, близких к 3/4 периода T, $(3/4)T+T$, $(3/4)T+2T$ и т. д., т. е. существуют так называемые зоны генерации. Это области значений напряжений на отражателе, при которых выходная мощность прибора отлична от нуля. Генерируемая мощность максимальна в центрах зон генерации при равенстве времени пролета $(3/4)T+nT$, где n — целое положительное число или нуль. В зависимости от значения n зоны называются нулевой, первой, второй и т. д.

Коэффициент полезного действия и области применения отражательных клистронов. В отличие от пролетного клистрона, в отражательном группировка пучка и отбор энергии осуществляются в одном и том же резонаторе. Это приводит к тому, что в установившемся режиме генерации модуляция пучка по скорости из-за большой напряженности электрического СВЧ поля в резонаторе слишком велика, в результате чего не удается получить плотные сгустки. Поэтому к. п. д. отражательных клистронов невелик (единицы процентов), и применение их ограничивается областями малых мощностей (десятки и сотни милливатт), где малый к. п. д. не является существенным недостатком.

В основном отражательные клистроны используются в измерительной аппаратуре как перестраиваемые СВЧ генераторы, а в супергетеродинных СВЧ приемниках и анализаторах спектра — в качестве гетеродинов.

Несмотря на все возрастающую конкуренцию со стороны полупроводниковых СВЧ приборов, таких, как диоды Ганна, туннельные диоды, лавинно-пролетные диоды и т. д., выпуск отражательных клистронов в количественном отношении остается еще самым высоким из всех типов СВЧ приборов. При этом вне конкуренции остается область миллиметровых и субмиллиметровых волн, в которой созданы и с успехом используются отражательные клистроны.

Заслуживают внимания также миниатюрные отражательные клистроны, которые по своим размерам и применению приближаются к полупроводниковым СВЧ приборам. В частности, у них рабочее напряжение не превышает 100 В, а их габариты — около 1 см.

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Ограничение полосы усиления пролетных клистронов связано с применением резонаторов. Замена их замедляющей системой позволяет получить прибор-усилитель, названный ЛБВ. Лампа бегущей волны обеспечивает усиление сигнала на 30—50 дБ в широкой полосе частот. Эта полоса в случае ЛБВ малой и средней мощностей до 10—100 Вт на выходе достигает одной-двух октав.

Принцип работы ЛБВ. Усиливаемый СВЧ сигнал подается на вход замедляющей системы (ЗС) из коаксиального или волноводного тракта через устройство связи (рис. 26), называемое часто согласующим устройством. Сюда же поступает сформированный электронной пушкой электронный поток, в котором скорости всех электронов v_0 практически одинаковы, а значение v_0 определяется ускоряющим анодным напряжением U_0. На коллекторном конце ЗС также имеется согласующее устройство, обычно такой же конструкции, как на входе, через которое усиленный сигнал переходит в выходной тракт прибора и направляется в нагрузку. Отработанный электронный поток поступает на коллектор, а фокусировка электронного пучка на протяжении его движения вдоль ЗС осуществляется либо с помощью соленоида, либо с помощью постоянных или периодически ориентированных магнитов (магнитная периодическая фокусирующая система — МПФС), либо электростатическими методами.

Принцип работы ЛБВ, так же как и пролетного клистрона, основан на динамическом управлении пучком электронов, т. е. на модуляции электронного

потока по скорости, которая по мере движения электронов к коллектору переходит в модуляцию по плотности, и отборе энергии от модулированного по плотности пучка.

Здесь, так же как и в клистроне, сгустки электронов возбуждают наведенный ток, протекание которого по ЗС вызывает появление высокочастотной напряженности электрического поля в направлении продольной оси ЗС. Однако,

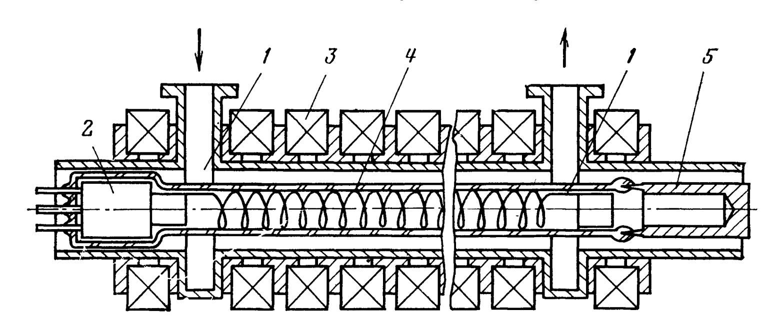


Рис. 26. Схема конструкции ЛБВ типа О с МПФС:

1 — согласующее устройство; *2* — электронная пушка; *3* — кольцевой постоянный магнит МПФС; *4* — стеклянный баллон ЛБВ «игольчатой» конструкции; *5* — коллектор

в отличие от клистронов, резонаторы которого обладают высокой добротностью, напряженность переменного электрического поля вдоль ЗС оказывается небольшой по сравнению с напряженностью поля в зазоре резонатора. Поэтому достаточно эффективное торможение сгустков электронов, а следовательно, и отбор энергии от модулированного по плотности электронного пучка удается осуществить сложением возбуждаемого на каждом участке ЗС высокочастотного поля с полем волны, бегущей вдоль замедляющей системы.

Если скорость электронов v_0 близка к фазовой скорости $v_ф$ бегущей по ЗС электромагнитной волны, то возбуждаемое на каждом из участков ЗС электромагнитное поле складывается в фазе с полем, возбужденным на соседнем участке, образуя единую волну, бегущую в направлении движения электронного потока. Амплитуда этой волны нарастает экспоненциально, а не линейно, так как усиливаемая волна в свою очередь воздействует на электронный поток, увеличивая его модуляцию.

Элементарные волны, возбуждаемые на соседних участках ЗС и бегущие навстречу электронному потоку, складываются в противофазе, т. е. вычитаются. Поэтому в ЛБВ возбуждаемая электронным потоком суммарная волна, бегущая навстречу электронному пучку, имеет ничтожную амплитуду по сравнению с прямой волной, и ею можно пренебречь.

Механизм модуляции электронного потока в ЗС поясняется на рис. 27. Рассмотрим движение четырех наиболее характерных электронов в немодулированном электронном потоке, поступающем на вход ЗС. В ускоряющем (область *I*

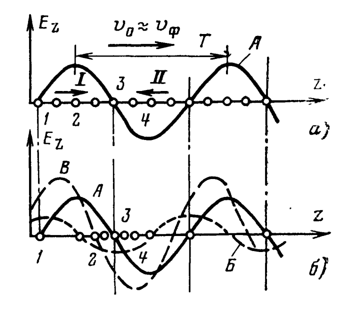


Рис. 27. Механизм модуляции электронного потока в замедляющей системе ЛБВ типа О:

а — электроны и бегущая замедленная волна на начальном участке ЗС; *б* — на некотором расстоянии от входа лампы (*А* — напряженность электрического поля волны, модулирующей пучок при точном синхронизме волны и пучка ($v_0 = v_ф$); *Б* — поле, наведенное сгустками; *В* — суммарное поле бегущей волны)

на рис. 27, *а*) и тормозящем (область *II*) полях находится одинаковое количество электронов. Если скорость электронов v_0 близка к фазовой скорости волны $v_ф$, то электроны, попавшие в ускоряющее (электрон *2* на рис. 27, *а*) и тормозящее (электрон *4* на рис. 27, *а*) поля, смещаются в направлении электрона *3*, постепенно образуя сгусток электронов с центром вблизи электрона *3*, на который высокочастотное электрическое поле не действует, так как в месте расположения этого электрона напряженность поля равна нулю (рис. 27, *б*, кривая *А*).

Образующийся сгусток возбуждает в свою очередь электромагнитную волну, отстающую от модулирующей волны на 90° (кривая *Б* на рис. 27, *б*), и складывается с этой первоначальной волной (кривая *В* на рис. 27, *б*). Это возможно при точном равенстве v_0 и $v_ф$. Если скорость электронов несколько увеличить, то образующиеся сгустки опережают первоначальную волну и возбуждаемое ими поле оказывается ближе по фазе к бегущей волне, а амплитуда результирующего поля возрастает. Если же еще увеличить v_0, то образование сгустков будет затруднено, так как электроны будут попадать последовательно то в ускоряющее, то в тормозящее поле, и отбор энергии от них становится невозможным. На практике максимальное усиление достигается при скорости электронов, на единицы процентов превышающей фазовую скорость замедленной электромагнитной волны.

Важно подчеркнуть, что возрастание амплитуды замедленной волны в ЗС при взаимодействии ее с электронным потоком вызывает в свою очередь увеличение модуляции электронного потока. Поэтому, начиная с некоторого расстояния от входа лампы (около 3—5$\lambda_з$, где $\lambda_з$ — замедленная длина волны), амплитуда поля вдоль ЗС начинает расти экспоненциально по мере распространения его в направлении коллекторного конца ЗС.

В ЛБВ, так же как и в клистроне, возрастание мощности СВЧ сигнала осуществляется за счет торможения электронов. Однако если в клистроне отбор энергии от модулированного электронного потока происходит в выходном резонаторе, то в ЛБВ отбор энергии осуществляется в основном на довольно протяженном выходном участке замедляющей системы (длиной 5—10 $\lambda_з$). При этом вследствие торможения сгустков в режиме усиления мощности нарушается синхронизм волны и пучка, и постепенно уменьшается эффективность отбора. Это является одной из основных причин, почему к. п. д. ЛБВ значительно меньше к. п. д. клистронов. (Обычно к. п. д. ЛБВ не превышает 20—25%.)

Некоторое уменьшение отрицательного влияния возникающего рассинхронизма можно получить, увеличивая на несколько процентов скорость электронов по сравнению с оптимальной, соответствующей максимуму усиления на входном участке лампы. Аналогичный эффект можно получить, постепенно увеличивая замедление волны на выходном участке ЛБВ, например, путем уменьшения периода ЗС.

Таким образом, ЛБВ может работать в двух режимах: при ускоряющем напряжении, оптимальном для усиления малого сигнала, и увеличенном напряжении, обеспечивающем получение максимальных выходной мощности и к. п. д. Первый режим называется режимом малого сигнала, а второй — режимом большого сигнала. В последнем случае коэффициент усиления несколько меньше, чем в первом случае.

Полоса усиления. Отличительной чертой ЛБВ является широкая полоса усиливаемых частот. В реальных ЛБВ она определяется полосой согласования внешних трактов с ЗС, полосой пропускания ЗС и наличием в ней дисперсии. Последний фактор в большинстве случаев является определяющим.

При изменении частоты входного сигнала меняется фазовая скорость. Тогда при фиксированном ускоряющем напряжении, а следовательно, и скорости электронов v_0 условие синхронизма выполняется в ограниченной полосе частот. Эта полоса тем меньше, чем круче дисперсия.

Минимальной дисперсией обладает спиральная ЗС, поэтому именно она применяется в широкополосных ЛБВ. В реальных приборах спираль закрепляется в диэлектрических опорах, имеющих вид стержней круглого или трапецеидального поперечного сечения. В такой конструкции трудно отвести тепло.

В ЛБВ средней и большой мощностей на выходном участке ЗС выделяется значительное количество тепловой энергии из-за высокочастотных потерь в металле и диэлектрике и разогрева ЗС оседающими электронами (до половины

энергии выходного сигнала). Поэтому в таких лампах со средней мощностью 1 кВт и более применяются цельнометаллические ЗС, обладающие высокой теплорассеивающей способностью (см. рис. 8). Недостатки этих ЗС — относительно узкая полоса пропускания и сильная дисперсия. Поэтому полоса усиления мощных ЛБВ редко превышает 10%.

Коэффициент усиления. Поглощающая вставка. Если в прямопролетных клистронах входной и выходной резонаторы практически полностью развязаны по высокой частоте, что позволяет получать стабильное усиление до 50—60 дБ, то в ЛБВ вход и выход связаны замедляющей системой.

В реальных приборах часть усиленного сигнала отражается от выходного согласующего устройства или нагрузки, возвращается по ЗС ко входу и снова частично отражается. Если амплитуда дважды отраженного сигнала превышает амплитуду первоначального, то на определенных частотах, на которых колебания на входе лампы складываются в фазе, происходит самопроизвольное нарастание амплитуды выходного сигнала, т. е. самовозбуждение. Если не принять специальных мер, такое самовозбуждение ЛБВ происходит при коэффициенте усиления уже около 10 дБ.

Для получения большего коэффициента усиления необходимо существенно уменьшить связь между входом и выходом ЛБВ по ЗС. Для этого обычно вводят затухание на коротком отрезке ЗС между входным и выходным участками. Этот отрезок ЗС носит название поглощающей вставки или локального поглотителя. Например, в случае спиральной ЗС затухание поглощающей вставки около 50—60 дБ получается при нанесении на диэлектрические опоры спирали поглощающего покрытия в виде пленки углерода. Толщина пленки плавно увеличивается от краев вставки к ее середине с тем, чтобы свести к минимуму отражения от нее. Коэффициент стоячей волны напряжения $K_{стU}$ поглощающей вставки обычно не превышает 1,01—1,03, что соответствует отраженной мощности $2{,}5 \cdot 10^{-3} - 2{,}25 \cdot 10^{-2}$% от падающей. При бо́льших отражениях возможно возникновение того же механизма самовозбуждения на отдельных участках лампы, как и в ЛБВ без поглотителя.

В мощных ЛБВ возникают затруднения с отводом тепла от локального поглотителя. Поэтому приходится разрывать ЗС и подсоединять к местам разрыва согласованные поглощающие нагрузки. На практике в местах разрыва ЗС применяются такие же согласующие устройства, как на входе и выходе лампы, и обычные согласованные нагрузки располагаются вне вакуумной части прибора. Однако, в отличие от поглощающей вставки, $K_{стU}$ таких выводов, как и у всех согласующих устройств, значительно хуже и равен примерно 1,2—1,3 (отраженная мощность составляет 0,83—1,7% падающей). Поэтому, чтобы предотвратить самовозбуждение, приходится укорачивать длину секций ЗС, а число их увеличивать до трех. В подобных конструкциях между секциями ЗС в местах их разрыва делаются сплошные металлические перегородки с трубкой малого диаметра в центре, внутри которой электронный поток проходит из одной секции в другую. Эта трубка для усиливаемого сигнала является запредельным волноводом, и ее длина должна быть такой, чтобы величина затухания в ней превышала значение коэффициента усиления. При этом в достаточной степени ослабляется связь между входом и выходом лампы по высокой частоте.

Введение поглощающей вставки в ЗС вызывает некоторое снижение коэффициента усиления (на 2—3 дБ) и существенное уменьшение к. п. д. лампы (примерно в 2 раза) за счет поглощения части усиливаемой волны и отбора энергии электронного потока под поглощающей вставкой.

Лампа обратной волны (ЛОВ) также является СВЧ прибором с длительным взаимодействием. В отличие от ЛБВ и ЛОВ, электронный поток взаимодействует с волной, бегущей ему навстречу. Это возможно при использовании таких ЗС, как двухзаходная спираль (биспираль) и встречные штыри (см. рис. 8. *г*).

Механизм взаимодействия волны и пучка в ЛОВ такой же, как и в ЛБВ. Взаимодействие осуществляется при близости скорости электронного пучка и фазовой скорости минус первой гармоники, направленных от пушки к коллектору. Поток энергии замедленной волны в этом случае направлен навстречу пучку, так как у отрицательных гармоник групповая скорость всегда направлена в противоположную сторону от направления фазовой скорости. Это приводит к установлению распределенной вдоль всей ЗС обратной связи. Тогда любая

флуктуация немодулированного электронного потока по плотности, сопровождающаяся возбуждением волны в каком-то месте ЗС, приводит к дополнительной модуляции пучка этими волнами на всем начальном участке ЗС.

При выполнении условия синхронизма возбуждаемые всеми электронными сгустками волны складываются в фазе, образуя единую волну, мощность которой постепенно возрастает в направлении, противоположном движению электронного потока.

Таким образом, на выходном вблизи коллектора участке ЗС промодулированный по плотности электронный поток отдает свою кинетическую энергию минус первой гармонике. Мощность ее, а следовательно, и мощность всей замедленной волны нарастают от коллекторного конца ЗС к пушечному. Выход СВЧ мощности расположен вблизи электронной пушки, где мы имеем максимальную мощность замедленной волны и минимальную модуляцию электронного потока по скорости и плотности.

Так как фазовая скорость минус первой гармоники зависит от частоты колебаний, то возникающие из шумовых флуктуаций колебания имеют частоту, для которой выполняется условие синхронизма с электронным потоком.

Как и в любом автогенераторе, возникновение генерируемых колебаний в ЛОВ происходит при достижении током в электронном пучке определенного значения, называемого пусковым током.

При изменении скорости электронов меняется генерируемая частота, для которой осуществляется синхронизм. Таким образом, меняя ускоряющее напряжение на ЗС, можно в широких пределах менять частоту генерации ЛОВ (примерно до октавы).

Конструкция ЛОВ схематически изображена на рис. 28. Здесь *1—3* — электронная пушка (катод *1*, фокусирующий катод *2*, анод *3*), *4* — замедляющая система, на коллекторном конце которой установлена хорошо согласованная поглощающая нагрузка *5*. С помощью согласующего устройства *6* на конце ЗС со стороны электронной пушки СВЧ энергия через стандартный коаксиальный или волноводный тракт *7* передается в полезную нагрузку. Сформированный электронной пушкой электронный поток проходит вдоль ЗС и попадает на коллектор *8*. Расширению пучка в радиальном направлении препятствует фокусирующая система, расположенная обычно снаружи баллона лампы (не показана на рис. 28).

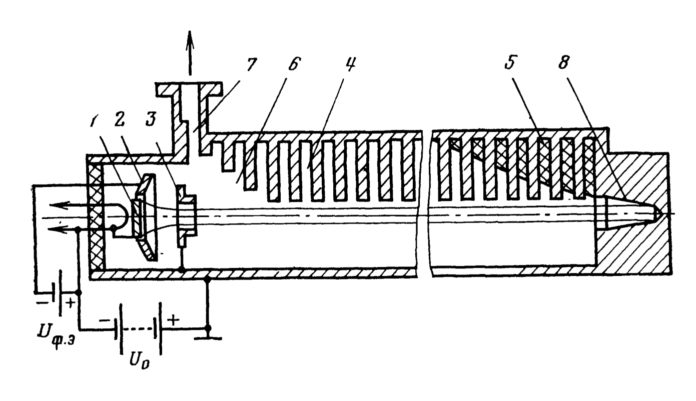
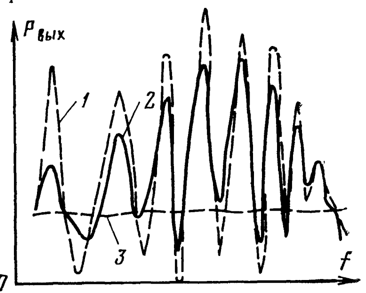
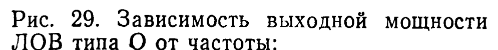


Рис. 28. Схема конструкции ЛОВ типа О

Типичная зависимость выходной мощности от частоты показана на рис. 29. С ростом ускоряющего напряжения U_0 увеличиваются мощность электронного пучка и выходная мощность прибора. Генерируемая частота изменяется приблизительно как $\sqrt{U_0}$. Но с дальнейшим ростом U_0 и частоты выходная мощность начинает падать, вследствие того что электромагнитное поле волны все сильнее прижимается к ЗС и эффективность взаимодействия волны и пучка постепенно падает.

Как видно из рис. 29, для ЛОВ характерна сильная изрезанность зависимости выходной мощности от частоты. Из-за отражений от концов ЗС и от нагрузки выходная мощность может быть на отдельных частотах выше средней, а на других — ниже, а на некоторых частотах, где ток пучка оказывается меньше пускового, выходная мощность может даже равняться нулю. Заметно выравнивает рассматриваемую характеристику хорошо согласованный оконечный




Рис. 29. Зависимость выходной мощности ЛОВ типа О от частоты:

1 — без поглотителя на коллекторном конце ЗС; *2* — с оконечным поглотителем; *3* — то же при использовании отрицательной обратной связи на управляющую сетку электронной пушки

поглотитель, устроенный и работающий примерно так же, как половинка поглощающей вставки в ЛБВ. Он устанавливается на коллекторном конце ЗС ЛОВ, а величина ослабления его должна быть не меньше 10—15 дБ, чтобы полностью погасить СВЧ мощность, возбуждаемую пучком в направлении коллектора и отраженную от согласующего устройства. Однако изрезанность зависимости выходной мощности от частоты все еще остается значительной из-за рассогласования выходного согласующего устройства и полезной нагрузки лампы (кривая *2* на рис. 29). Кроме того, как отмечено, к существенной неравномерности выходной мощности по диапазону приводит изменение связи электронного потока с полем замедленной волны.

При использовании ЛОВ в панорамных измерителях $K_{стU}$, ослабления и усиления требуется практически идеальное постоянство выходной мощности лампы в пределах рабочего диапазона частот. Достигается это введением специальной отрицательной обратной связи. Между анодом и катодом лампы ставится управляющая сетка (не показана на рис. 28), на которую относительно катода подается отрицательное напряжение, полученное с детектора, установленного на конце направленного ответвителя прямой волны, распространяющейся к полезной нагрузке. Это отрицательное напряжение тем больше, чем больше в данный момент мощность падающей волны. В результате зависимость выходной мощности от частоты становится практически постоянной (кривая *3* на рис. 29).

Как и все пространственные гармоники, минус первая имеет максимальное значение взаимодействующей с электронным потоком компоненты электрического СВЧ поля E_z на поверхности ЗС. По мере удаления от поверхности значение E_z быстро спадает так, что в области, занятой электронным пучком, E_z невелика. Поэтому, а также вследствие того что максимальной модуляции по плотности пучок достигает в области минимального СВЧ поля, для ЛОВ типа О характерен малый к. п. д., который редко превышает 1—3%. Лампы обратной волны ЛОВ типа О обычно разрабатывают на малый уровень выходной мощности, измеряемой десятками милливатт, а их главная область применения — измерительные генераторы малой мощности с широкой электронной перестройкой, используемые, как отмечено в панорамных измерителях $K_{стU}$, ослабления и усиления.

СВЧ ПРИБОРЫ ТИПА М

Наиболее распространенным источником мощных СВЧ колебаний является магнетрон. Этот прибор был изобретен советскими инженерами Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым в 1939 г. Появление магнетрона позволило сделать большой шаг в развитии радиолокации. Имея относительно простую конструкцию, малые массу и габариты, магнетрон позволил существенно увеличить частоту и мощность СВЧ колебаний радиопередающих устройств при весьма высоком к. п. д.

Магнетрон был первым в серии так называемых приборов типа М, в которых используется движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. В последующие годы появились другие приборы типа М: ЛБВМ, ЛОВМ и т. д.

Механизм взаимодействия электронного потока с замедленной электромагнитной волной в приборах типа М проще всего понять на примере ЛБВ типа М. Рассмотрим участок ЗС (рис. 30), например, гребенки *1* с параллельной ей

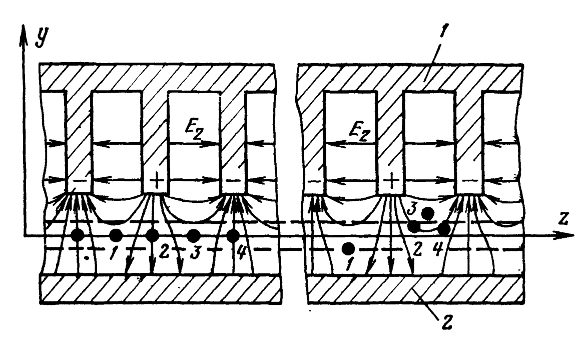


Рис. 30. Распределение силовых линий электрического СВЧ поля бегущей волны вдоль гребенчатой ЗС ЛБВ типа М (——— — граница невозмущенного электронного потока)

металлической планкой *2*, между которыми проходит электронный поток. Пусть на гребенку подан положительный относительно планки потенциал, создающий между ЗС и пластиной электростатическое поле с напряженностью $E_=$ в направлении навстречу оси y, т. е. в направлении, перпендикулярном продольной оси z. Система помещается в постоянное магнитное поле, направленное вдоль оси x, т. е. перпендикулярное как направлению электростатического поля, так и направлению продольной оси z.

Как уже отмечено, электронный поток вводится в пространство между гребенкой и планкой со скоростью $v=E_=/B$, где B — индукция магнитного поля. При этом траектории электронов прямолинейны. Соотношение $E_=$ и B подбирают так, чтобы электроны двигались синхронно с волной, распространяющейся по ЗС в том же направлении, что и электронный поток. Качественная структура электрического поля замедленной волны в виде силовых линий показана на рис. 30.

На начальном участке ЗС одинаковое количество электронов попадает в каждую фазу волны. Кинетическая энергия одних электронов уменьшается, а других — увеличивается при взаимодействии с компонентой E_z замедленной волны. При этом нарушается равновесие между силой электростатического поля — eE и силой Лоренца vB. Для электронов, попавших в ускоряющее поле волны и отобравших у нее часть энергии, сила Лоренца возрастает, и эти электроны перемещаются ближе к планке. В то же время электроны, отдавшие часть своей кинетической энергии, перемещаются ближе к ЗС. Таким образом, первые отдают часть своей кинетической энергии электростатическому полю, а вторые — восполняют потерю, смещаясь в область с более высоким электростатическим потенциалом. В результате скорости их движения в продольном направлении в среднем остаются прежними и равными $E_=/B$. Следует подчеркнуть, что электроны, отдающие энергию волне, приближаются к замедляющей системе и попадают в более сильное СВЧ поле, а неблагоприятные электроны, отбирающие энергию от волны, отдаляются от ЗС и их влияние на процесс усиления уменьшается. Другими словами, происходит как бы сортировка «полезных» электронов, попавших в тормозящую фазу, и «вредных», попавших в ускоряющую фазу СВЧ поля.

Наряду с продольным СВЧ электрическим полем E_z на электроны действует и поперечное СВЧ электрическое поле E_y, которое, складываясь и вычи-

таясь с электростатическим электрическим полем $E_=$, несколько ускоряет или замедляет продольное движение электронов. В результате электроны, попавшие в меньшее суммарное поперечное электрическое поле, отстают от волны, а попавшие в большее суммарное электрическое поле опережают волну. Нетрудно убедиться, что и те, и другие смещаются в сторону электронов, находящихся в максимальном тормозящем поле замедленной волны.

Таким образом, в приборах типа М наряду с сортировкой в поперечном направлении y происходит образование сгустков в продольном направлении z. Если в ЛБВ типа О сгустки образуются в минимуме продольного электрического поля и для получения большего усиления необходимо увеличивать скорость электронов относительно фазовой скорости замедленной волны, то в приборах типа М сгустки образуются в максимуме тормозящего поля и возбужденное ими поле складывается в фазе с модулирующим полем.

В ЛБВ типа О усиление мощности сопровождается торможением сгустков и нарушением синхронизма, что является одной из причин сравнительно низкого к. п. д. В приборах типа М скорость сгустков в продольном направлении остается при взаимодействии с замедленной волной синхронной с ее фазовой скоростью. Отдаваемая же волне энергия электронов в сгустках пополняется за счет потенциальной энергии электростатического поля благодаря смещению электронов к ЗС. Все это позволяет получать в приборах типа М как высокое усиление, так и высокий к. п. д. Так, например, к. п. д. ЛОВ типа М (так называемых «карсинотронов») достигает 30% и более.

Основные узлы ЛБВ и ЛОВ типа М те же, что и в аналогичных приборах типа О. Отличие состоит в применении поперечного магнитного поля в приборах типа М и особенностях конструкции электронных пушек. Кроме этого, для уменьшения габаритов и массы магнитной системы приборы типа М часто как бы сворачивают в кольцо. Такое «свертывание» позволяет замкнуть саму на себя ЗС или электронный поток или и то, и другое вместе. Тем самым в приборе может быть установлена сильная обратная связь.

Интересной особенностью приборов типа М является повышение эффективности взаимодействия электронов с волной по мере роста напряженности поля волны в ЗС, что приводит к увеличению коэффициента усиления при возрастании входной мощности до определенного значения и далее вплоть до самовозбуждения, т. е. генерирования СВЧ мощности. Иными словами, можно получить усилительные ЛОВ типа М, ЗС которых имеет и выход, и вход СВЧ сигнала. Одна из таких ламп диапазона волн 3 см имеет на выходе 750 кВт в импульсе при усилении 18 дБ и к. п. д. около 40%.

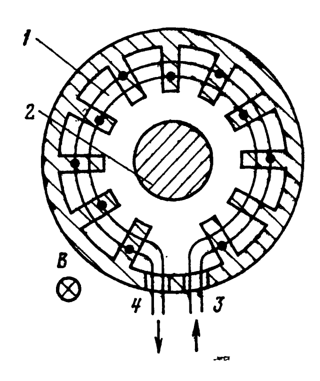


Рис. 31. Схема устройства амплитрона

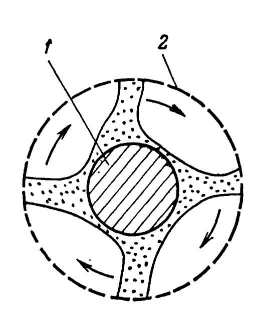


Рис. 32. «Спицы» из облака электронов, вращающиеся в пространстве анод — катод магнетрона или амплитрона:

1 — катод; *2* — граница замедляющей системы

Лампа обратной волны типа М, в которой обратная связь усиливается при создании непрерывного и замкнутого по кольцу электронного потока, называется амплитроном. Конструкция амплитрона схематически показана на рис. 31. Здесь ЗС *1* свернута в кольцо, катод *2* имеет цилиндрическую форму. На входе и на выходе расположены согласующие устройства *3* и *4*. Точками показаны соединения кольцевых связок ЗС с ламелями анодного блока.

При отсутствии СВЧ сигнала на входе эмитируемые с поверхности катода электроны возвращаются постоянным магнитным полем к катоду, образуя вращающееся по окружности (по часовой стрелке) облако. Потенциал ЗС относительно катода и напряженность постоянного магнитного поля выбираются так, чтобы скорость вращения электронов в облаке была равна фазовой скорости минус первой гармоники волны в ЗС. При подаче на ЗС СВЧ сигнала (направление энергии СВЧ сигнала против часовой стрелки) достаточно большой амплитуды происходит модуляция электронного облака, подобная модуляции электронного потока в ЛБВМ. Электроны, попавшие в тормозящее поле, приближаются к ЗС, а попавшие в ускоряющее поле возвращаются на катод. Из облака электронов как бы образуются «спицы» (рис. 32), вращающиеся синхронно с волной вокруг катода.

ЭНЕРГЕТИКА СВЧ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ДИАПАЗОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для радиоэлектронных устройств, предназначенных для использования в промышленности и сельском хозяйстве (т. е. в народном хозяйстве), выделены диапазоны частот, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Промышленные диапазоны электромагнитных колебаний

f, МГц	Страны	Основные применения	Диапазоны частот
0,06 — 0,08	СССР	Индукционный нагрев	НЧ
13,56 ± 0,00678	Все страны		ВЧ
27,16 ± 0,16	» »		
40,68 ± 0,02	» »		ОВЧ
433,92 ± 0,87	Австрия, ФРГ, Португалия		
866	Англия		
915 ± 25	Все страны, кроме Англии, Испании		УВЧ
2375 ± 50	Все социалистические страны	СВЧ нагрев	
2450 ± 50	Все страны, кроме социалистических стран	» »	
5800 ± 75	Все страны		СВЧ
22125 ± 125	» »		

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКОВ В ДИАПАЗОНАХ УВЧ и СВЧ

В подавляющем большинстве случаев нагрев каких-либо физических тел производится путем передачи тепла снаружи во внутрь за счет теплопроводности.

На СВЧ при рациональном подборе частоты колебаний и параметров камер, где происходит преобразование СВЧ энергии в тепловую, можно получить относительно равномерное выделение тепла по объему тела. Эффективность преобразования энергии электрического поля в тепло возрастает прямо пропорцио-

нально частоте колебаний и квадрату напряженности электрического поля. При этом следует отметить простоту подачи СВЧ энергии практически к любому участку нагреваемого тела.

Важное преимущество СВЧ нагрева — тепловая безынерционность, т. е. возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый материал. Отсюда высокая точность регулировки процесса нагрева и его воспроизводимость.

Достоинством СВЧ нагрева является также принципиально высокий к. п. д. преобразования СВЧ энергии в тепловую, выделяемую в объеме нагреваемых тел. Теоретическое значение этого к. п. д. близко к 100%. Тепловые потери в подводящих трактах обычно невелики, и стенки волноводов и рабочих камер остаются практически холодными, что создает комфортные условия для обслуживающего персонала.

Важным преимуществом СВЧ нагрева является возможность осуществления и практического применения новых необычных видов нагрева, например избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося.

Избирательный нагрев основан на зависимости потерь в диэлектрике от длины волны, т. е. зависимости тангенса угла диэлектрических потерь δ как функции длины волны λ. При этом в многокомпонентной смеси диэлектриков будут нагреваться только те части, где высокий $\operatorname{tg} \delta$.

Равномерный нагрев. Обычно передача тепла осуществляется за счет конвекции, теплопроводности и излучения. Отсюда неизбежен температурный градиент (перепад) от поверхности в глубину материала, причем тем больший, чем меньше теплопроводность. Уменьшить или почти устранить большой градиент температур можно за счет увеличения времени обработки. Во многих случаях только за счет медленного нагрева удается избежать перегрева поверхностных слоев обрабатываемого материала. Примерами таких процессов являются обжиг керамики, получение полимерных соединений и т. п. С помощью СВЧ энергии можно не только равномерно нагревать диэлектрик по его объему, но и получать по желанию любое заданное распределение температур. Поэтому при СВЧ нагреве открываются возможности многократного ускорения ряда технологических процессов.

Сверхчистый нагрев. Если при нагреве газовым пламенем, а также с помощью дуговых горелок происходит загрязнение материалов, то СВЧ энергию можно подводить к обрабатываемому материалу через защитные оболочки из твердых диэлектриков с малыми потерями. В результате загрязнение практически полностью устраняется. Кроме того, помещая нагреваемый материал в откаченный объем или инертный газ, можно устранить окисление его поверхности. Загрязнения от диэлектрика, через который подводится СВЧ энергия, весьма малы, так как в случае малых потерь даже при пропускании большой СВЧ мощности этот диэлектрик остается практически холодным.

Саморегулирующийся нагрев. При нагреве для целей сушки качество получаемого материала существенно улучшается за счет того, что нагрев высушенных мест автоматически прекращается. Объясняется это тем, что тангенс угла диэлектрических потерь таких материалов, как, например, дерево, прямо пропорционален влажности. Поэтому с уменьшением влажности в процессе сушки потери СВЧ энергии уменьшаются, а нагрев продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где еще сохранилась повышенная влажность.

ПОЛУЧЕНИЕ СВЧ ЭНЕРГИИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Чтобы применение СВЧ энергии было экономически оправданно, необходимо выбирать такие СВЧ приборы, которые имели бы в сочетании следующие характеристики: высокий к. п. д. преобразования энергии промышленной частоты в СВЧ энергию (не менее 50, а лучше 70—90%); высокий уровень выходной мощности в непрерывном режиме (около 1 кВт и более); простые и дешевые источники питания (желательно питать СВЧ прибор, непосредственно подключая его к вторичной обмотке силового трансформатора промышленной электросети без выпрямителей и фильтров); простота конструкции, надежность, большой срок службы (не менее 2—5 тыс. ч); возможность эффективной работы при переменной нагрузке.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют магнетроны, пролетные многорезонаторные клистроны и амплитроны.

Наибольшее распространение в качестве источника СВЧ энергии получили магнетроны. Относительная простота конструкции малые размеры и высокий к. п. д. делают их наиболее пригодными для использования во многих областях СВЧ энергетики. Опыт применения магнетронов и исследование их свойств привели к тому, что в настоящее время они почти исключительно применяются в промышленных СВЧ установках. Однако в перспективе им могут составить серьезную конкуренцию пролетные многорезонаторные клистроны. В начале 70-х годов благодаря оптимизации параметров с помощью ЭЦВМ был получен к. п. д. пролетных клистронов выше 70%. Такой высокий к. п. д. в сочетании с электростатической фокусировкой и непосредственным питанием через повышающий трансформатор от сети промышленной частоты позволит заменить магнетроны в ряде применений.

Амплитроны имеют к. п. д. 60—70, а иногда и 80%. Однако принципиально амплитроны схожи с магнетронами и имеют в основном те же недостатки: катод находится в пространстве взаимодействия, отработанные электроны бомбардируют волноведущую систему и т. д.

Рассмотрим подробнее работу магнетрона непрерывного действия в качестве источника СВЧ энергии для промышленного применения.

Применение последовательного электромагнита. Создание магнитного поля магнетрона с помощью электромагнита, включенного последовательно в анодную цепь прибора, позволяет упростить схему питания, понизить стоимость установки, повысить устойчивость работы магнетрона при колебаниях напряжения сети и изменениях параметров высокочастотной нагрузки (ее модуля и фазы). Кроме того, применение последовательного электромагнита открывает возможность простой регулировки выходной мощности в довольно широких пределах.

Упрощение схемы питания достигается рациональным выбором параметров электромагнита, в результате чего магнетрон может работать при непосредственном включении последовательно соединенных анодной цепи магнетрона и обмотки электромагнита в цепь вторичной обмотки силового трансформатора по схеме двухполупериодного выпрямления. Если индуктивность электромагнита недостаточна, то для сглаживания пульсаций анодного тока дополнительно последовательно с электромагнитом может быть включен дроссель. Суммарная индуктивность должна составлять 10—30 Гн. Эта схема наиболее проста и удобна, когда в установке работают два магнетрона, а через обмотки электромагнита протекает слегка пульсирующий постоянный анодный ток поочередно генерирующих магнетронов (рис. 33). Переменная составляющая анодного тока может быть в достаточной степени уменьшена за счет увеличения индуктивности дросселя и электромагнитов.

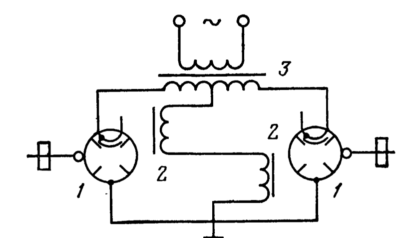


Рис. 33. Схема безвыпрямительного питания магнетронов с последовательными электромагнитами от сети переменного тока промышленной частоты:

1 — магнетрон; 2 — электромагнит; 3 — высоковольтный трансформатор

При работе двух магнетронов открываются новые возможности для улучшения использования СВЧ энергии. Так, например, если генерируемые частоты несколько отличны друг от друга, то можно получить более равномерное распределение плотности СВЧ энергии по объему, в котором происходит тот или иной технологический процесс.

Рассмотренная схема питания используется в СВЧ печи «Волжанка-2», разработанной отечественной промышленностью.

В качестве примера приведем характеристики магнетрона для промышленного применения типа М571. Его основные параметры следующие: рабочая частота 2375±50 МГц; выходная мощность 2,5 кВт в непрерывном режиме при $K_{стv}<1,1$; анодное напряжение 3,6 кВ; анодный ток 1,1 А; мощность накала 300 Вт; магнитная индукция 0,135 Т; $K_{стv}$ нагрузки, допустимой в любой фазе, при питании от стабилизированного выпрямителя до 3,5.

Рабочими характеристиками магнетронов называют зависимости анодного напряжения $U_а$ и выходной мощности $P_{вых}$ от анодного тока $I_а$. Зависимость $U_а=f(I_а)$ называют также вольт-амперной характеристикой.

Если сравнить рабочие характеристики магнетрона М571 при работе с постоянным магнитом и с последовательным электромагнитом при питании его от выпрямителя со сглаживающим фильтром, то можно отметить следующее. Применение электромагнита позволяет более плавно регулировать выходную мощность, меняя $U_а$, причем к. п. д. η остается достаточно высоким (более 46%) при изменении $P_{вых}$ от 2,5 ($\eta=60\%$) до 0,5 кВт ($\eta=46\%$).

Нагрузочными характеристиками магнетрона называют зависимости $I_а$ и $P_{вых}$ от модуля и фазы комплексной нагрузки. Сравнение нагрузочных характеристик при тех же условиях, при которых рассматривались рабочие характеристики, показывает, что применение последовательного электромагнита позволило существенно уменьшить изменение анодного тока и выходной мощности при изменении фазы нагрузки. А это, в свою очередь, не только улучшает использование СВЧ энергии, но и положительно сказывается на долговечности магнетрона.

Рабочие и нагрузочные характеристики при безвыпрямительном питании магнетрона с применением дросселя и последовательного электромагнита по схеме, изображенной на рис. 33, практически не отличаются от характеристик магнетрона при строго постоянном анодном напряжении.

Уменьшение пульсаций магнитного поля. Современные магнетроны имеют металлокерамическую конструкцию, причем стенки корпуса анодного блока, выполненные из меди, достигают по толщине 9—10 мм. Эта особенность конструкции оказалась весьма полезной для уменьшения пульсаций магнитного поля в пространстве взаимодействия за счет поверхностного эффекта на частоте 100 Гц, т. е. на частоте пульсаций в однофазных двухполупериодных схемах выпрямления. Толщина поверхностного слоя для меди на частоте 100 Гц $\delta=6,7$ мм. При этом переменная составляющая магнитного поля в пространстве взаимодействия H_2 будет составлять всего лишь 0,2 переменной составляющей магнитного поля вне корпуса анодного блока H_1 ($H_2/H_1=e^{-10/6,7}\approx0,2$).

Поэтому если амплитуда пульсаций анодного тока 20% среднего значения, то амплитуда пульсаций напряженности магнитного поля в пространстве взаимодействия для магнетрона М571 — всего 2—3%. Это, в свою очередь, позволяет считать магнитное поле в пространстве взаимодействия постоянным, и требования к стабилизации источников питания для создания постоянного магнитного поля могут быть существенно снижены.

Сравнение электромагнитов и постоянных магнитов. Современные конструкции электромагнитов по размеру и массе не превышают постоянных магнитов с теми же параметрами. Электромагнит для магнетрона М571 является малогабаритным (210×130×110 мм), его масса — около 4 кг. Благодаря секционированию обмоток и наличию ребер электромагнит не требует принудительного охлаждения, так как тепловые потери обмоток невелики сами по себе. Расход энергии на питание электромагнита значительно перекрывается улучшением электронного к. п. д. магнетрона и увеличением его СВЧ мощности. Кроме того, при использовании электромагнитов уменьшается стоимость эксплуатации установок. При замене магнетрона электромагнит остается, в то время как пакетированный магнетрон заменяется вместе с постоянным магнитом.

РЕЗОНАТОРНЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ УСТАНОВОК СВЧ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Конструкция резонаторных камер должна быть такой, чтобы внутри них нагрев был одинаков в любой части внутреннего объема, занятого обрабатываемым диэлектриком. С другой стороны, объем камер должен быть достаточно

большим, чтобы в течение каждого цикла обрабатывать значительное количество материала и полностью использовать мощность СВЧ генератора. Как уже говорилось, для промышленного применения выделены небольшие участки спектра электромагнитных излучений, поэтому произвольно выбирать рабочую длину волны нельзя. Одним из наиболее удобных диапазонов для нагрева диэлектриков является диапазон волн вблизи 12,6 см (2375±50 МГц).

Исходя из приведенных требований в устройствах СВЧ нагрева находят применение резонаторные камеры в виде прямоугольных объемных резонаторов, линейные размеры которых в 5—6 раз превышают длину волны генератора. В подобном резонаторе может существовать несколько различных видов колебаний (более десяти), у каждого из которых свое распределение электрического и магнитного полей внутри объема резонатора. Такие резонаторы называются многомодовыми, т. е. в них может быть одновременно возбуждено несколько видов колебаний.

Поля различных видов колебаний, если они возбуждены от одного генератора с фиксированной длиной волны, могут в различных точках внутреннего объема резонатора интерферировать, т. е. складываться или вычитаться. В результате в некоторых точках могут быть более сильные поля (от сложения полей нескольких видов колебаний), а в других — более слабые (вследствие вычитания). Поэтому суммарное поле может быть существенно неравномерным.

Размеры и параметры объемных резонаторов могут быть рассчитаны на ЭЦВМ и оптимизированы. Задача оптимизации состоит в том, чтобы выбрать такие размеры резонатора, при которых в нем можно было бы возбуждать только определенные виды колебаний, а интерференция между ними давала бы возможно более равномерное поле по объему. При этом возбуждающие колебания устройства должны устанавливать строго определенные соотношения между амплитудами тех видов колебаний, которые дают суммарное равномерное поле.

Несколько иной способ получения равномерности нагрева — это применение двух или более генераторов, работающих на разных, но обычно близких частотах, или введение изменения во времени генерируемой длины волны в некоторых возможных пределах $\pm\Delta\lambda$.

Чем ближе по шкале длин волн расположены виды колебаний рассматриваемого многомодового резонатора, тем меньшее изменение длины волны генератора оказывается достаточным для улучшения равномерности нагрева и получения равномерного электромагнитного поля в нем даже при слабой загрузке резонатора обрабатываемым диэлектриком.

Для СВЧ нагрева наиболее пригодны такие многомодовые резонаторы, у которых резонансные длины волн различных видов колебаний расположены по шкале длин волн не сгустками, а возможно более равномерно. Это получается, когда размеры резонатора a, b и $l_{рез}$ соизмеримы, но не равны, т. е. когда резонатор представляет собой параллелепипед, близкий к кубу, но не куб (рис. 34).

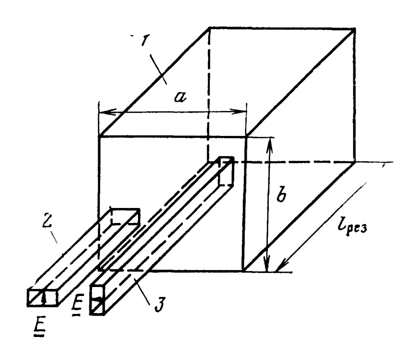


Рис. 34. Возбуждение рабочей камеры устройств нагрева диэлектриков:
1 — рабочая камера; *2* и *3* — прямоугольные волноводы от СВЧ генераторов с рабочими длинами волн λ_1 и λ_2

Например, для рабочего диапазона длин волн 12,6±0,252 см практически равномерный спектр резонансных длин волн или резонансных частот достигается при соотношениях $a\times b\times l_{рез}=52\times57\times58$ или $56\times57\times60$ см. Резко неравномерный спектр получается при $a\times b\times l_{рез}=58\times60\times60$ или $59\times59\times60$ см и тем

более в кубическом резонаторе 59×59×59 см. Интересно, что в первом случае в полосе длин волн 12,6±0,252 см имеется 62 вида колебаний с различными резонансными частотами, во втором — 56, а соответственно в третьем, четвертом, пятом — только 30, 33 и 15.

Если резонансные частоты двух или нескольких видов колебаний равны между собой, то такие виды колебаний называются вырожденными. В кубическом резонаторе имеется шестикратное вырождение многих видов колебаний, а в третьем и четвертом — двух- и иногда трехкратное вырождение. Вот почему в этих резонаторах меньше резонансных частот, чем в первом и во втором, при одной и той же рассматриваемой полосе рабочих длин волн.

Уровень загрузки резонаторных камер. Здесь необходимо различать два случая. Если резонатор полностью заполнен диэлектриком с высоким значением диэлектрической проницаемости ε и большими потерями, то резко падает его нагруженная добротность и согласовать ввод энергии, обеспечивающий полную передачу СВЧ энергии от генератора в объем диэлектрика, относительно просто.

Сложнее обстоит дело, если резонатор загружен диэлектриком слабо или когда в резонаторе имеется значительный объем диэлектрика с малым ε (меньше 2) или малый объем диэлектрика с высоким значением ε. При этом собственные виды колебаний резонатора несколько смещаются по частоте, а добротность резонатора для этих видов колебаний снижается незначительно. Поэтому такой резонатор в первом приближении можно рассчитывать без учета потерь.

Возбуждение рабочих камер. Так как в промышленных установках необходимо передавать в рабочую камеру СВЧ мощность высокого уровня, измеряемую киловаттами в непрерывном режиме, то из многих типов возбуждающих устройств оказываются пригодными только такие, которые имеют достаточную электрическую прочность. К подобным возбуждающим устройствам, например, относится открытый конец прямоугольного волновода, расположенный в соответствующем месте стенки рабочей камеры (см рис. 34).

Открытый конец волновода помещается там, где у требуемых видов колебаний в резонаторе располагаются пучности магнитного поля, причем направление силовых линий магнитных полей должно быть параллельным как в возбуждающем волноводе с волной H_{10}, так и для рабочего вида колебаний в камере. Наоборот, для тех видов колебаний, возбуждение которых нежелательно, в этом месте должен быть узел магнитного поля или же силовые линии их магнитных полей должны быть перпендикулярны силовым линиям магнитного поля рабочих видов колебаний.

На рис. 34 схематически показаны рабочая камера и два возбуждающих ее волновода. Применяя два ввода, можно увеличить число возбуждаемых в заданном диапазоне видов колебаний и увеличить таким образом равномерность нагрева диэлектрика.

Чтобы избежать передачи СВЧ энергии из одного ввода в другой, можно применять либо разную их поляризацию (вектор **E** в волноводе *2* перпендикулярен вектору **E** в волноводе *3* на рис. 34), либо поместить второй ввод в области узлов магнитного поля тех видов колебаний, которые возбуждаются первым вводом, либо применить оба этих способа.

СВЧ НАГРЕВ ДВИЖУЩИХСЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛЕНТ И ИЗДЕЛИЙ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Применение СВЧ нагрева движущихся лент позволяет существенно поднять производительность установок нагрева и во многих случаях значительно улучшить качество выпускаемой продукции. Так, полимеризация в СВЧ полях капроновых канатов увеличивает их прочность на разрыв в несколько раз. При СВЧ сушке стеклоленты удается понизить ее конечную влажность до 1% и увеличить скорость процесса до 4—5 м/мин. Длина камеры, в которой происходит сушка, составляет 1 м при СВЧ мощности на входе 1,5 кВт. Сушка СВЧ нагревом бумажной ленты на бумагоделательных комбинатах позволяет увеличить скорость протягивания ленты через сушильную камеру с 8 до 100 м/мин.

Первоначально в высокочастотных установках для фиксации и сушки крученых изделий из синтетических волокон обрабатываемые изделия протягивали между пластинами конденсаторов.

Главными недостатками этих установок являлись низкий к. п. д., сложность экранирующих конструкций и электрические пробои при влажном состоянии изделий. Эти недостатки можно устранить, применив в качестве основы камеры сушки и фиксации ЗС, по продольной оси которой протягивается крученое волокно, а на конце ЗС подключается согласованная нагрузка (рис. 35), которая

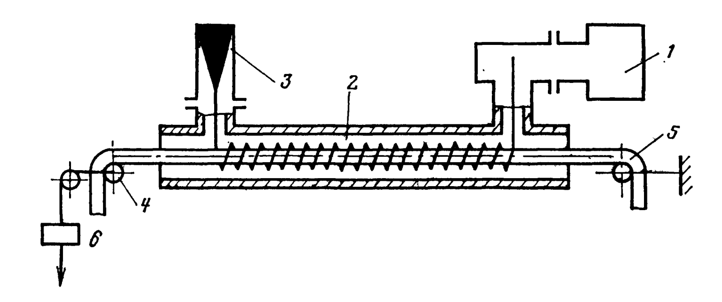


Рис. 35. Схема установки для фиксации и сушки крученых изделий из синтетических волокон:

1 — СВЧ генератор; *2* — камера для фиксации сушки в виде замедляющей системы; *3* — согласованная нагрузка; *4* — станция для натяжения и транспортирования синтетического изделия *5*; *6* — груз

служит для поддержания режима бегущей волны в ЗС. Это дополнительно уменьшает опасность пробоя по сравнению со случаем, когда в ЗС был бы режим стоячей волны. Таким образом, обрабатываемое изделие протягивается в области сильного высокочастотного электрического поля замедленной бегущей вдоль ЗС волны и занимает значительную часть поперечного сечения, в пределах которого расположено электромагнитное поле этой волны. Кроме того, благодаря замедлению волны длина камеры получается существенно меньше, чем в случае применения волноводов или коаксиальных линий. Отметим также, что направления движения изделия и бегущей электромагнитной волны могут совпадать (режим прямотока или прямоточная сушилка), а могут быть и противоположными (режим противотока). В режиме прямотока наибольшая подводимая к сушилке СВЧ мощность приходится на влажные части обрабатываемого диэлектрика, а в режиме противотока — на почти сухие. Важно еще отметить, что при проектировании подобных сушилок необходимо учитывать не только поглощение изделием СВЧ энергии, но и конвективный теплообмен с окружающим пространством.

Обеспечение равномерности нагрева по толщине. Для тонких лент (бумаги, стеклоткани и т. п.) проблемы неравномерности нагрева по толщине не возникает, поскольку толщина лент меньше (обычно в 200—500 раз) рабочей длины волны и нагревающее электрическое СВЧ поле практически не меняется по толщине материала. Иное дело для материала круглого поперечного сечения (капроновые канаты, сосисочный фарш и пр.), где диаметр поперечного сечения соизмерим с рабочей длиной волны (скажем, более $0,1\lambda$), особенно если диэлектрическая проницаемость материала велика и равна нескольким десяткам. Тогда электрическое СВЧ поле, а следовательно, и нагрев по сечению могут быть крайне неравномерны. Если не добиться равномерности выделения тепла по сечению, то выравнивание температуры будет происходить за счет теплопроводности и тогда, чтобы не перегреть области с сильным полем, придется снижать мощность СВЧ нагрева и удлинять время обработки. В результате преимущества СВЧ нагрева могут быть сведены к нулю.

Рассмотрим конкретный пример. В первых установках для нагрева стержней круглого поперечного сечения применялся круглый волновод с волнами типа E_{0i}, вдоль продольной оси которого по кварцевой трубке пропускалось нагреваемое вещество (рис. 36). При больших значениях ε обрабатываемого ди-

электрика, равных 20—50 и более, распределение тепла по радиусу получается очень неравномерным: вблизи оси — максимум нагрева, а затем с увеличением r все более быстрый спад почти до нуля, причем спад тем более быстрый, чем больше ε (рис. 37).

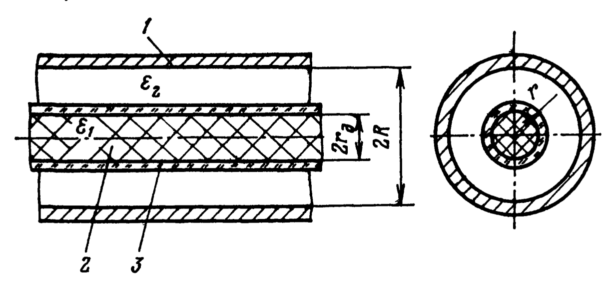


Рис. 36. СВЧ нагреватель диэлектрического стержня в виде круглого волновода:

1 — волновод; 2 — нагреваемый диэлектрик; 3 — кварцевая трубка

Обозначим через $\gamma_1 = \sqrt{\varepsilon_1 k^2 - \beta^2}$ радиальную постоянную для области, занимаемой диэлектриком. Здесь $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, а $\beta = 2\pi/\lambda_в$ — постоянная распространения волны вдоль продольной оси в объеме обрабатываемого диэлектрика.

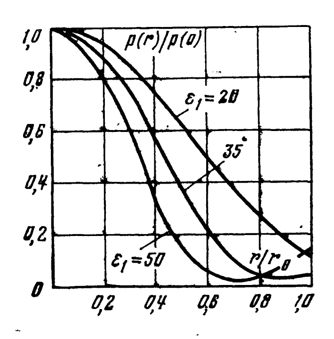


Рис. 37. Распределение мощности источников тепла $P(r)/P(0)$ в зависимости от $r/r_д$ для различных значений ε_1 в нагревателе, изображенном на рис. 36 ($r_д = 1$ см; $R = 5$ см; $\lambda = 12{,}6$ см)

Теоретический анализ показывает, что мощность источников тепла $P(r)$ в зависимости от $\gamma_1 r$ изменяется волнообразно, а перемещать максимумы и минимумы по направлению r можно изменяя γ_1. Поэтому для получения равномерного распределения источников по r необходимо подобрать соответствующие значения γ_1. Как видно из формулы для γ_1, при заданных значениях ε_1 и $k = 2\pi/\lambda$ это равноценно подбору соответствующего значения $\beta = 2\pi/\lambda_в = \omega/v_ф$, т. е. фазовой скорости волны $v_ф$ вдоль продольной оси волноведущей системы.

Нагрев по сечению будет равномерным, если первый от оси максимум функции $P(r) = f(\gamma_1 r)$ располагается в пределах обрабатываемого диэлектрика при некотором значении $0 < r_0 < r_д$, а минимум этой функции, в отличие от графиков, приведенных на рис. 37, будет расположен вне диэлектрика, т. е. при $r_0 > r_д$. Соответствующие расчеты показывают, что наименьшее отклонение функции $P(r) = f(\gamma_1 r)$ от равномерной имеет место при $r_0/r_д = 0{,}5$ и не превышает $\pm 7\%$ своего значения на оси.

Для конкретного случая: $r_д = 1$ см; $\varepsilon_1 = 35$; $\lambda = 12{,}6$ см, т. е. $k = 2\pi/\lambda = 0{,}5$ 1/см ($\varepsilon_1 = 35$ соответствует диэлектрической постоянной обрабатываемого материала, который при термообработке на СВЧ требует равномерного распределения температуры по радиусу). Постоянная распространения волны β получается по расчету равной 1,56 1/см и $\lambda_в = 2\pi/\beta = 4$ см, т. е. длина волны в волноводе получилась меньше длины волны в свободном пространстве $\lambda = 12{,}6$ см.

Это значит, что для получения равномерного нагрева по радиусу следует применить замедляющую систему осесимметричного типа с замедлением, равным двум — трем. Это сравнительно небольшое замедление характерно для ЗС типа цепочки связанных резонаторов или диафрагмированного волновода. Именно такая ЗС и применяется в установке для термообработки, например сосисочного фарша, схематически показанной на рис. 38.

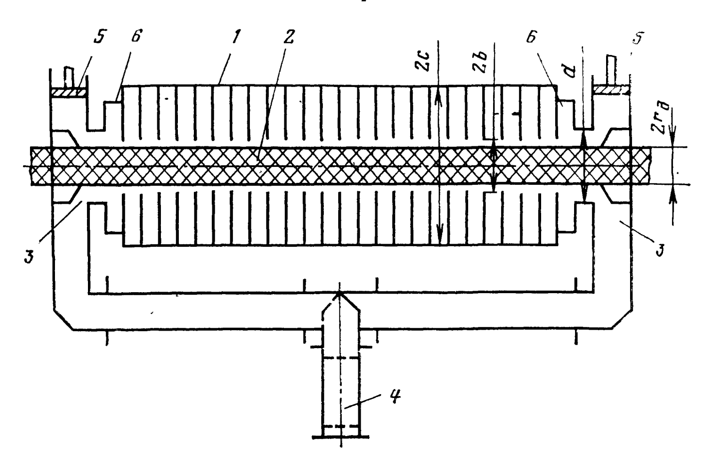


Рис. 38. Схема СВЧ нагревателя для термообработки сосисочного фарша:

1 — ЗС типа «диафрагмированный волновод»; 2 — кварцевая трубка, заполненная фаршем; 3 — коаксиально-волноводный переход; 4 — трехдецибельный мост для деления мощности СВЧ генератора пополам; 5 — короткозамыкающие поршни в прямоугольном волноводе; 6 — согласующие секции диафрагмированного волновода

Теперь, когда известны диаметр диэлектрика $2r_0$ и его диэлектрическая проницаемость ε_1, рабочая длина волны λ и замедление m, при котором имеет место равномерное распределение тепловых источников по поперечному сечению, и тип ЗС, необходимо так подобрать ее геометрические размеры, чтобы, кроме требуемого значения m (т. е. β), дисперсия вблизи рабочей длины волны была как можно меньше. Тогда легче добиться согласования ЗС с прямоугольным волноводом, по которому подается СВЧ энергия. Увеличивается также полоса частот, в которой замедление постоянно и становятся менее жесткими допуски на размеры конструктивных элементов ЗС.

Одно и то же замедление, но при разной крутизне дисперсионной характеристики при рабочей длине волны можно получить при разных сочетаниях размеров b и c (см. рис. 38). Наименьшая дисперсия получается при $b=1{,}35$ см и $c=4{,}3$ см.

Отметим интересные конструктивные особенности установки, приведенной на рис. 38. Во-первых, СВЧ энергия от генератора разветвляется на две равные части в трехдецибельном волноводном мосте и подается с обоих концов ЗС типа цепочки связанных резонаторов (диафрагмированного волновода) навстречу друг другу через коаксиально-волноводные переходы. В этом случае получается более «мягкий» нагрев обрабатываемого материала, а генератор предохраняется от отражений в периоды отсутствия сырья. Длина рабочей части ЗС выбрана такой, чтобы встречные волны при заполнении центральной части ЗС фаршем, т. е. диэлектриком с большими потерями, затухали немного дальше середины волновода. Диаметр d выбирают таким, чтобы в пределах этого отрезка коаксиальной линии не было высших типов волн, а могла распространяться только волна типа ТЕМ. Согласование прямоугольного волновода с ЗС осуществляется экспериментально путем подбора положения короткозамыкающих поршней, диаметра внешнего проводника первой секции ЗС и формы утолщения центрального проводника в коаксиально-волноводном переходе.

Сравнительные измерения показали, что при применении ЗС типа цепочки связанных резонаторов перепад температуры по радиусу составляет 6°С (от 64 на оси до 70°С при $r=r_д$), а в круглом волноводе 37°С (от 68 на оси до 31°С у стенки кварцевой трубки).

ПЛАЗМЕННЫЕ СВЧ ГОРЕЛКИ (ПЛАЗМОТРОНЫ) И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Свойства электронно-ионной плазмы. Плазма — это состояние вещества, находящегося в газообразном состоянии, в котором большое количество атомов и молекул ионизированно; атомы стали ионами, т. е. электрически заряженными частицами, потеряв один или несколько электронов. Кроме ионов в плазме имеются и свободные электроны. Если их заряд приблизительно равен заряду ионов, то такая плазма называется квазинейтральной, т. е. в целом ее электрический заряд равен нулю.

Для понимания физики взаимодействия плазмы с СВЧ колебаниями необходимо отметить следующие обстоятельства.

Электрические и магнитные поля на СВЧ во времени меняются столь быстро, что за время нарастания амплитуды электрического поля от нуля до максимума (четверть периода СВЧ колебаний) электроны смещаются на очень небольшие расстояния x: $x \approx 2eE/(\omega^2 m)$, где e и m — соответственно заряд и масса электрона. Важно обратить внимание, что x пропорционально E и обратно пропорционально квадрату угловой частоты сигнала ω. При амплитуде $E=E_m=$ $=100$ В/см и $\lambda=10$ см $(\omega=2\pi\cdot 3\cdot 10^9$ рад/с$)$ $x=0{,}01$ мм. При $E_m=10$ кВ/см $x=1$ мм.

Наименьшая масса иона у водорода, но и она в 1840 раз больше m. В результате при тех же условиях смещение иона водорода будет равно всего лишь 10^{-5} или 10^{-3} мм. Отсюда важное следствие: на СВЧ можно пренебречь движением ионов под действием СВЧ сигнала и рассматривать только движение электронов.

Основные параметры плазмы: N — концентрация заряженных частиц в единице объема; ε — относительная диэлектрическая проницаемость плазмы на СВЧ, которая определяется без учета соударений электронов с ионами и нейтральными молекулами только значениями N и ω по формуле

$$\varepsilon = 1 - Ne^2/(\omega^2 m \varepsilon_0) = 1 - \omega^2_п/\omega^2,$$

где $\omega_п = \sqrt{\dfrac{Ne^2}{m\varepsilon_0}}$ — плазменная круговая частота, а $\varepsilon_0 = 0{,}886\cdot 10^{-11}$ А·с/(В·м) — диэлектрическая проницаемость свободного пространства. Из формулы видно, что плазма является диэлектриком, у которого $\varepsilon<1$, но могут быть и случаи, когда ε становится отрицательной величиной или равняется нулю (при $\omega=\omega_п$) или, переходя к плазменной частоте $f_п$ в герцах и подставляя численные значения e, m и ε_0, можно получить $f_п = \dfrac{\omega_п}{2\pi} = 8980\sqrt{N}$ Гц, т. е. однозначно определяется концентрацией заряженных частиц в единице объема N. Из этого выражения видно, что при концентрации заряженных частиц в единице объема от 10^9 до 10^{14} $1/см^3$ плазменные частоты будут соответствовать СВЧ диапазону.

Физически представить плазменную частоту можно следующим образом. Предположим, что в квазинейтральной плазме мы отклонили один из электронов от положения равновесия и отпустили. Кулоновские силы, притягивающие электроны к ионам, будут возвращать его к положению равновесия (ионы из-за большой массы неподвижны!). Набрав определенную скорость, электрон проскочит положение равновесия, отклонится в другую сторону и подобно маятнику будет качаться около положения равновесия (конечно, с затуханием). Эта частота качаний электронов около положения равновесия и равна $f_п$.

Активную проводимость плазмы σ, а значит, и затухание СВЧ колебаний в ней определяет параметр ν, который называется частотой соударений — это количество соударений заряженных частиц с нейтральными в единицу времени. Максимальное значение σ получается при $\omega=\nu$, а ν тем больше, чем больше давление газа p.

Важным для практического применения плазмы параметром является ее температура T, которая характеризуется некоторой средней скоростью движения свободных электронов в ней. Температура плазмы при СВЧ разряде обычно 6000—7000К. С другой стороны, и электропроводность плазмы σ, и ее диэлектрическая проницаемость ε являются функциями температуры T.

Принцип устройства СВЧ плазмотронов заключается в передаче СВЧ энергии веществу, находящемуся в газообразном состоянии, с целью перевода его в плазму. Обычно газ подается под определенным давлением (может быть выше, ниже или равным атмосферному) по диэлектрической, чаще всего кварцевой или керамической трубке, которая должна быть помещена в область максимальной напряженности электрического поля СВЧ колебаний. В стационарном состоянии выход тепла из плазмы полностью компенсируется поступлением в плазму СВЧ энергии, т. е. плазма является активной нагрузкой для генератора СВЧ.

При расчете плазмотронов основные параметры плазмы, такие, как σ, ε, T, длина волны СВЧ сигнала λ, считаются постоянными, поэтому плазму рассматривают как диэлектрик с потерями и задача расчета заключается в оптимизации передачи СВЧ энергии в этот диэлектрик при одновременном снижении отраженной энергии.

Одним из наиболее простых по конструкции является плазмотрон волноводного типа, схематически изображенный на рис. 39. Разрядная диэлектрическая трубка пропущена через середины широких стенок прямоугольного волновода и перпендикулярно им. Вне волновода разрядная трубка окружена экранирующими металлическими трубками, являющимися запредельными волноводами для СВЧ сигнала, возбуждающего плазму.

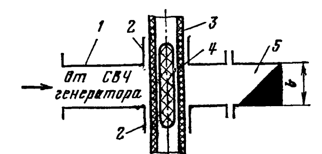


Рис. 39. Схема устройства плазмотрона волноводного типа:

1 — прямоугольный волновод (b — размер узкой стенки); *2* — экранирующие запредельные трубки; *3* — разрядная диэлектрическая трубка; *4* — плазменный шнур; *5* — согласованная нагрузка

Плазма имеет вид шнура или цилиндра с диаметром $d_{пл}$, на 2—3 см меньшим внутреннего диаметра разрядной трубки D, и длиной, лишь немного превышающей размер узкой стенки прямоугольного волновода b. Плазменный шнур ограничен по длине в тех точках запредельных экранных трубок, где СВЧ мощность уже недостаточна для поддержания разряда, т. е. горения плазмы.

Одним концом плазмотрон волноводного типа подсоединен к СВЧ генератору, а другим — к согласованной нагрузке или замкнутому на конце отрезку прямоугольного волновода (короткозамыкателю). Одна часть СВЧ энергии поглощается в плазме, а оставшаяся доля частично проходит за разряд и частично отражается от него.

Для компенсации отраженной волны между генератором и разрядной трубкой включают различные подстраивающие элементы, что эквивалентно подключению разрядной области через трансформатор связи. Плазмотроны с трансформаторами связи принято называть плазмотронами резонаторного типа.

Более однородные по радиусу характеристики плазмы имеют место в плазмотроне на основе радиальной линии, представляющей собой два параллельно расположенных диска, в центре которых перпендикулярно дискам проходит разрядная трубка. В такой радиальной линии должна быть возбуждена радиальная ТЕМ волна, сходящаяся равномерно со всех сторон к плазменному шнуру, находящемуся на оси системы.

Примеры плазмотронов волноводного типа. Изображенный на рис. 39 плазмотрон представляет собой волноводно-коаксиальный переход, причем внутренним проводником коаксиальной линии служит плазменный шнур, а внешним — экранирующие металлические трубки. В данном плазмотроне необходимо учитывать активные потери в плазменном шнуре.

При выбранных геометрических размерах плазмотрона и рабочей частоте СВЧ генератора главным расчетным параметром является температура плазмы. Однако для построения обобщенных характеристик плазмотронов, не зависящих от свойств и термодинамического состояния плазмообразующего газа, а также для удобства математических расчетов оказалось удобнее вместо темпе-

ратуры использовать в качестве основного расчетного параметра отношение радиуса плазменного шнура $r_{пл}$ к глубине поверхностного слоя на плазменном образовании δ. При расчете δ учитываются свойства и термодинамическое состояние газа, в котором будет образована плазма.

На рис. 40 приведены расчетные кривые $K_{стv}$ в подводящем волноводе $a \times b = 72 \times 34$ мм с волной H_{10} и коэффициента передачи СВЧ энергии в разряд η для плазмотрона с согласованной нагрузкой (пунктирные линии) и для плазмотрона с короткозамыкающим поршнем (сплошные линии). Рабочая длина волны 12,6 см; внутренний диаметр экранирующих трубок $2R = 22$ мм; диаметр плазменного шнура $2r_{пл} = 7$ мм. Отношение $r_{пл}/R$ в расчетные формулы входит под знаком логарифма, поэтому оно мало влияет на характеристики плазмотрона. В качестве плазмообразующего газа использовался азот при атмосферном давлении.

На рис. 40 приведены также кривые отношения мощности $P_{пад}$, подводимой к плазмотрону, к удельной мощности $P_{пл}$, поглощаемой в единице длины плазменного столба, находящегося в центре широкой стенки волновода. Эти кривые имеют минимум, в котором потребляемая от СВЧ генератора мощность минимальна. Правые ветви этих кривых соответствуют устойчивым режимам разряда.

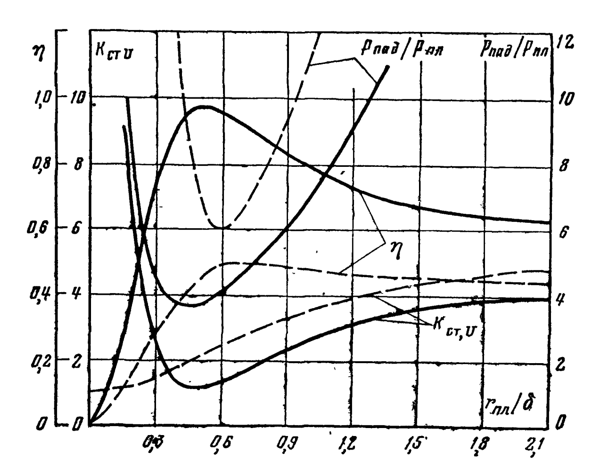


Рис. 40. Расчетные зависимости коэффициента передачи η, $K_{ст\,v}$ и $P_{пад}/P_{пл}$ от отношения $r_{пл}/\delta$ для плазмотронов волноводного типа с согласованной нагрузкой и короткозамыкателем

Действительно, и при постоянной мощности, подводимой к плазмотрону, в разряде устанавливается определенная температура. Если режим работы соответствует некоторой точке на правой ветви кривой, то случайные малые изменения температуры в разряде вызывают ряд процессов, возвращающих температуру к стационарному значению. Если температура случайно уменьшится, то длина разряда уменьшится, что приведет к увеличению удельной мощности $P_{пл}$ и разогреву плазмы. Если температура случайно возрастает, то длина разряда возрастает и $P_{пл}$ уменьшится, что приведет к остыванию плазмы. Этот механизм саморегулирования поддерживает в разряде постоянную температуру, соответствующую СВЧ мощности, подводимой к разряду.

Граница устойчивости разряда соответствует значениям $r_{пл}/\delta \approx 0,3 \div 0,6$. При этом, например, температура плазмы азота равна 5500—5800К. Удельная мощность $P_{пл}$, требуемая для поддержания в плазме заданной температуры, может быть определена по кривой, приведенной на рис. 41. Далее по кривым $P_{пад}/P_{пл}$ на рис. 40 можно определить и значение $P_{пад}$, при которой в плазме температура равна требуемому значению

Если проанализировать приведенные на рис. 40 и 41 данные, то можно сделать следующие важные для практики выводы.

В плазмотроне с короткозамыкателем осуществляется значительно более эффективное использование СВЧ энергии, чем в плазмотроне с согласованной нагрузкой: η_{max} соответственно равны 0,97 и 0,5; минимальные мощности СВЧ генератора, требуемые для поддержания устойчивости разряда, равны соответственно 0,5 и 1,2 кВт. Минимальная температура СВЧ разряда в азоте при атмосферном давлении равна 5500К.

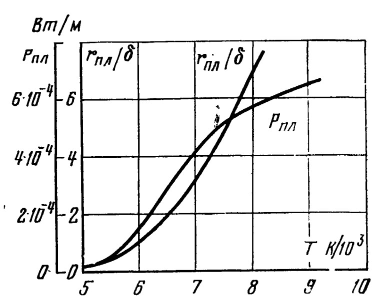


Рис. 41. Зависимость $r_{пл}/\delta$ и $P_{пл}$ от температуры СВЧ разряда в азоте при атмосферном давлении

При экспериментах с рассматриваемыми плазмотронами расход газа подбирался минимально возможным с тем, чтобы сохранить стабильность разряда. В этом случае теплоотвод от разряда определялся в основном теплопроводностью газа на стенки разрядной трубки. Длина плазменного столба в плазмотроне с согласованной нагрузкой равнялась 4 см при поглощаемой в разряде мощности 900 Вт, что меньше расчетного значения на 20—30%. Объясняется это тем, что при расчете не учитывался спад температуры на концах плазменного шнура и вынос тепла из плазмы потоком газа при определении значения $P_{пл}$ в соответствии с кривой, изображенной на рис. 41. Однако приведенные на рис. 40 и 41 расчетные данные дают удовлетворительную точность и могут быть использованы для предварительных расчетов конструктивных параметров плазмотронов.

Рассмотрим пример практического применения плазмотронов.

СВЧ плазменный источник возбуждения спектра. Наиболее часто в качестве источника тепла для разогрева порошков веществ, исследуемых с помощью анализаторов спектра, использовались газовые горелки. Для них характерна достаточная стабильность горения, а главным недостатком является внесение в зону нагрева продуктов горения газа, которые во многих случаях могут загрязнять обрабатываемый или анализируемый материал. Кроме того, температура, даваемая газовыми горелками, для анализа многих элементов недостаточна. С помощью плазмотронов может быть получен в атмосфере защитных газов — азота, гелия или аргона — стабильный нагрев до 8000К без каких-либо загрязнений. Для спектрального анализа применяют и электрические дуги постоянного и переменного токов. Они позволяют получить требуемую температуру, но не дают желаемой стабильности и вносят загрязнения продуктами разрушения электродов. Поэтому при их использовании воспроизводимость и точность анализа недостаточны.

Высокотемпературный стабильный плазменный источник возбуждения спектра представляет собой установку, состоящую из двух блоков — блока питания и СВЧ блока, в который входят магнетрон М571 с регулируемой непрерывной мощностью 0 до 2,5 кВт на длине волны 12,6 см и плазмотрон волноводного типа с согласованной нагрузкой.

Схема СВЧ блока применительно к спектральному анализу приведена на рис. 42. Газ для образования плазмы подается в трубку из кварцевого стекла через завихряющую форсунку, не показанную на схеме. Через эту же форсунку

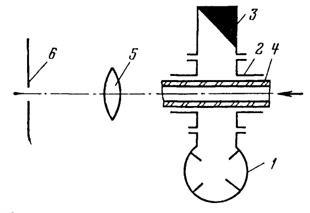


Рис. 42. Схематическое изображение СВЧ блока плазменного источника возбуждения спектра типа ПВС-1:

1 — магнетрон; *2* — плазмотрон волноводного типа; *3* — согласованная нагрузка; *4* — кварцевая трубка для подачи плазмообразующих газов и образования плазменного столба; *5* — конденсор; *6* — щель анализатора спектра

или вдоль оси кварцевой трубки по отдельной трубке подается анализируемое вещество, которое распыляется в виде аэрозоля. Излучение плазменного столба через конденсатор проектируется на щель анализатора спектра, с помощью которого производится анализ обычными спектральными методами. Расход газа может составлять 8—30 л/мин при давлении, близком к атмосферному, плазменный столб длиной 25—30 мм имеет диаметр — 5—8 мм. Коэффициент передачи СВЧ энергии в разряд 0,55—0,6.

Время анализа по сравнению с химическими методами сокращается в 2—5 раз. Вследствие высокой температуры, высокой чистоты в зоне нагрева и высокой стабильности плазменного источника появилась возможность анализировать как легко- и средневозбудимые, так и трудновозбудимые элементы, а также определять с высокой точностью средние и большие концентрации элементов. Кроме того, из-за отсутствия электродов открылась возможность анализа кислотных и щелочных растворов.

Практическое использование источника ПВС-1 показало, что температура плазмы СВЧ разряда равна 4000—8000К, коэффициент вариации, характеризующий нестабильность самого источника, 1,5—2%, а при анализе коэффициент вариации 2—3%, чувствительность анализа 10^{-3}—10^{-4} мг/мл.

ИЗЛУЧАТЕЛИ СВЧ ЭНЕРГИИ

Излучатели СВЧ энергии фактически представляют собой передающие антенны того или иного типа, направляющие СВЧ энергию на обрабатываемый участок материала; СВЧ излучатели необходимы там, где надо нагревать часть большого предмета.

Подобные излучающие устройства необходимы и при СВЧ сушке некоторых материалов, и при влагометрии, и при стерилизации ран на поверхности тела, и при воздействии на культуры микроорганизмов и т. д.

Простейшим СВЧ излучателем является открытый конец волновода (рис. 43). Для ограничения высокочастотных токов по фланцу, а следовательно, и СВЧ поля применяют специальные канавки *1*, заполненные поглощающим материалом (*b* — размер узкой стенки волновода).

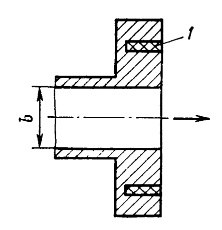


Рис. 43. СВЧ облучатель в виде открытого конца волновода прямоугольного поперечного сечения

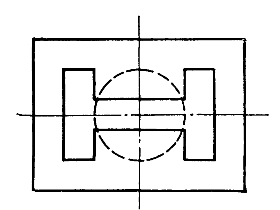


Рис. 44. СВЧ облучатель в виде открытого конца Н-образного волновода

Открытый конец стандартного прямоугольного волновода является весьма эффективной антенной. Даже без каких-либо подстроечных устройств $K_{\text{ст}v}$ в волноводе равен 1,6, т. е. от открытого конца волновода отражается менее 5,5% передаваемой по волноводу мощности.

Меньшую площадь облучения дает излучатель в виде открытого конца Н-образного волновода (рис. 44). На этом рисунке пунктиром показана зона максимального нагрева.

Наилучшее согласование со свободным пространством имеет рупорная антенна с корректирующей диэлектрической линзой *1* в ее раскрыве (рис. 45). Она применяется либо для создания плоского фронта СВЧ волн (рис. 45, *а*), либо фокусировки СВЧ излучения на небольшой площади подобно обычной двояко-

выпуклой линзы в оптическом диапазоне. Минимальный диаметр пятна в фокусе получается примерно равным рабочей длине волны λ (рис. 45, *б*).

На рис. 46 показан рупорно-параболический облучатель, применяемый для раскалывания бетонных плит. При $\lambda = 12{,}6$ см и $P_{изл} = 2{,}5$ кВт бетонная плита толщиной 200 мм раскалывается через несколько секунд или минут после начала облучения.

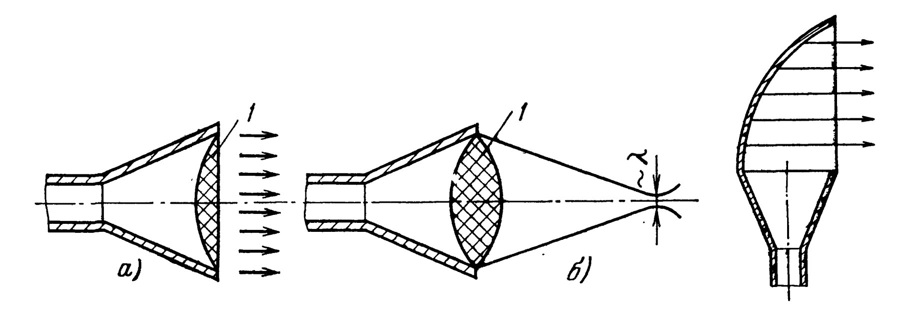


Рис. 45. СВЧ облучатель в виде рупорно-линзовой антенны для создания плоского фронта волны (*а*) и для фокусировки излучения (*б*)

Рис. 46. СВЧ облучатель в виде рупорно-параболической антенны

При использовании электромагнитных волн коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов применение резонаторных камер, ЗС и волноводов, в которых производится воздействие СВЧ колебаний на вещество, становится нецелесообразным из-за их малых поперечных размеров. Более эффективно осуществить направленное излучение СВЧ энергии и при этом получить равномерное по интенсивности поле облучения на заданной площади и близкое к нулю поле вне этой площади.

Равномерное излучение на прямоугольном участке поля создает пирамидальный рупор, подключенный к прямоугольному волноводу с волной H_{10}. Однако постоянство плоскости поляризации напряженности электрического поля **E** в этом случае допустимо не для всех применений. Например, наиболее эффективно воздействуют миллиметровые волны на бактерии тогда, когда вектор **E** параллелен большему размеру бактерии. А так как бактерии ориентированы в облучаемом пространстве хаотически, то для повышения эффективности облучения желательно иметь равномерное по мощности распределение поля на площади, ограниченной кругом, и в пределе этой площади иметь круговую поляризацию вектора **E**.

Подобного типа облучатель для рабочей длины волны $7{,}1 \pm 0{,}2$ мм изображен на рис. 47. Он состоит из перехода со стандартного прямоугольного волновода сечением $2{,}6 \times 5{,}2$ мм на круглый волновод диаметром 6,2 мм. В этом переходе волна H_{10}, распространяющаяся в прямоугольном волноводе, плавно и без отражений преобразуется в волну H_{11} круглого волновода с сохранением плоскости поляризации вектора **E**. Для получения круговой поляризации вектора напряженности электрического поля в круглом волноводе используется секция круглого волновода, в которую помещена четвертьволновая полистироловая пластина ($\varepsilon = 2{,}56$) толщиной 1,1 мм и длиной 10 мм с плавным сужением на концах для предотвращения отражений, плоскость которой расположена под углом 45° к направлению вектора **E** в прямоугольном волноводе. Далее круглый волновод диаметром 6,2 мм переходит в излучающий рупор с углом раскрыва 36° и диаметром раскрыва 150 мм. Применялись также рупоры с раскрывами 50 и 300 мм. Для формирования равномерного поля облучения в раскрыве рупора помещена диэлектрическая линза из фторопласта ($\varepsilon = 2{,}08$), имеющая специально рассчитанный профиль на стороне, обращенной к волноводу, и плоскую поверхность на стороне объекта облучения.

Идеальную равномерность поля в пределах радиуса R получить невозможно. Равномерность считается достаточной, если перепады интенсивности поля в пределах круга радиуса R не превышают 3 дБ.

Наилучшая равномерность напряженности поля получилась при раскрыве рупора 150 мм. Размер равномерно облучаемой поверхности при этом можно регулировать изменением расстояния L. При $L \geqslant 400$ мм равномерность поля по сечению луча уже практически не меняется. Таким образом, увеличивая L, можно получить увеличение диаметра $2R$ равномерно облученной поверхности.

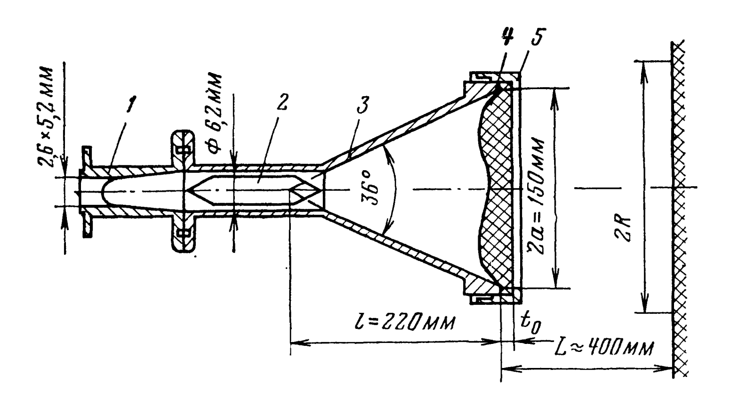


Рис. 47. Облучатель с круговой поляризацией вектора напряженности электрического поля:

1 — переход с прямоугольного волновода с сечением 2,6×5,2 мм на круглый волновод диаметром 6,2 мм; *2* — фазосдвигающая диэлектрическая пластина; *3* — рупор с раскрывом 150 мм; *4* — линза из фторопласта; *5* — прижимное кольцо

Применение рассмотренной квазиоптической системы формирования пучка электромагнитных волн позволило передавать на облучаемую поверхность 80% энергии, излучаемой рупором при допустимом изменении интенсивности напряженности электрического поля на 3 дБ от максимального значения. Без применения описанной системы формирования на равномерно облучаемую поверхность приходится только 55% излученной рупором энергии поля волны H_{11}. Применение линзы эквивалентно увеличению площади облучаемой поверхности примерно в 1,5 раза.

Таким образом, рассмотренный тип облучателя позволяет получить равномерную с точностью 3 дБ облучаемую поверхность на длине волны 7,1 мм диаметром от 50 до 300 мм. Диаметр облучаемой поверхности определяется расстоянием от рупорно-линзовой антенны до объекта облучения.

СУБЛИМАЦИОННАЯ СУШКА

Одним из сравнительно новых способов консервации продуктов, обеспечивающих максимальное сохранение вкусовых свойств и качеств свежих, является сублимационная сушка. При такой сушке хорошо сохраняются витамины, белки и ароматические вещества, продукты имеют малую массу и в герметичной упаковке, например из полиэтиленовой пленки, могут без ухудшения качества храниться многие годы.

В технологическом процессе сублимационной сушки продукты сначала быстро замораживают, потом помещают в вакуумную камеру, где производится откачка давления остаточных газов до 2,7—8 Па. В вакууме происходит интенсивное испарение льда. Этот процесс идет с поглощением тепла. Чтобы в процессе испарения температура продукта не падала слишком сильно, необходимо подводить тепло извне. Это так называемая теплота возгонки.

Сублимационную сушку можно проводить путем теплоизлучения: например, получать тепло от специальных пластин, нагреваемых горячей жидкостью и помещаемых в вакуумной камере вблизи лотков с замороженными продуктами. Постепенно лед будет испаряться (практически полностью), а продукт приобретает вид губки значительно меньшей массы. Испаряемая влага не откачивается насосами, а конденсируется на специальных конденсационных пластинах, охлаждаемых до температуры ниже — 55°С. Эти пластины периодически очищают от наросшего льда.

После герметизации в полиэтиленовые пакеты сублимированные продукты можно перевозить и хранить без охлаждения.

Наиболее длительной и сложной технологической операцией при теплоизлучении является возгонка льда, которая в начале процесса сушки проходит при температуре поверхности продукта (—40÷—50)°С. В процессе сушки граница между высушенной и замороженной частями продукта, т. е. поверхность возгонки, постепенно перемещается вглубь, так что снаружи образуется высушенный слой с малой теплопроводностью, который препятствует передаче тепла к внутренним замороженным частям продукта. В результате для сушки теплоизлучением требуется от 8 до 24 ч. Если попытаться сократить это время, то можно перегреть наружные высушенные слои.

Сверхвысокочастотный нагрев позволяет подводить тепло равномерно по всему объему. А это позволяет уменьшить время сушки в 10 раз и более, что обеспечивает в конечном счете не только уменьшение стоимости сушки в 2—5 раз, но и улучшает качество сушеной продукции. Кроме того, появляется возможность создания не камерных, а конвейерных установок для сублимационной сушки. Общие капиталовложения, необходимые для сооружения крупного цеха сублимационной сушки с СВЧ нагревом, примерно на 30% меньше, чем при использовании нагрева за счет теплоизлучения.

Рассмотрим некоторые особенности сублимационной сушки с помощью СВЧ нагрева на примере сушки мяса.

При равномерном выделении тепла в объеме диэлектрика с потерями, каким в нашем случае является замороженное мясо, мощность потерь в единице объема (в ваттах на кубический сантиметр) определяется по формуле

$$P = 0{,}287\, E^2 f \varepsilon'' \cdot 10^{-6},$$

где f — частота, МГц; E — напряженность электрического поля, В/см; ε'' — коэффициент диэлектрических потерь в продукте.

На рис. 48 показаны зависимости ε' и ε'' от температуры сырого и высушенного мяса. По этим кривым видно, что ε' и ε'' существенно уменьшаются в процессе сушки. Поэтому в первой половине технологического процесса необходимо несколько увеличивать подводимую мощность, но не настолько, чтобы произошло размораживание продукта или возник электрический СВЧ дуговой разряд. При дуговом разряде бесполезно теряется СВЧ мощность и происходит подгорание продукта. Если при атмосферном давлении пробивная напряженность электрического поля 30 000 В/см, то при давлении остаточных газов 13,3—40 Па имеет место минимальная пробивная напряженность электрического поля, равная около 100 В/см в импульсе. При рабочих же давлениях в сушильных камерах менее 8 Па пробивная напряженность поля превышает 170 В/см на частоте 915 МГц и превышает 400 В/см для частоты 2450 МГц.

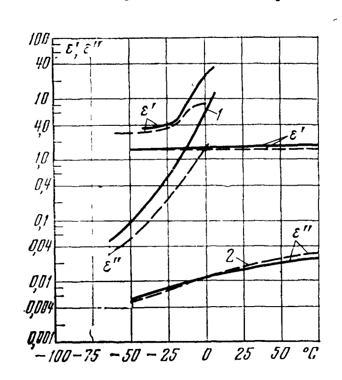


Рис. 48. Зависимости коэффициента потерь ε'' и диэлектрической постоянной ε говядины от температуры:

1 — для сырого мяса; *2* — для мяса, высушенного сублимационной сушкой (сплошная линия — на частоте 1000 МГц; пунктирная линия — на частоте 3000 МГц)

В процессе сушки поверхностные слои при СВЧ нагреве становятся практически сухими и обладают малой теплопроводностью, поэтому их температура

становится положительной и может достигать нескольких десятков градусов. Максимальная температура высушенных частей не должна превышать определенных для каждого вида продуктов значений, чтобы не произошло ухудшения качества. Так, для говядины максимально допустимая температура +50°С, а для свинины — +40°С. Таким образом, чтобы не произошло перегрева наружных слоев, в конце процесса сушки надо уменьшать подводимую СВЧ мощность.

С другой стороны, как видно из рис. 48, при температурах ниже нуля потери (ε″) примерно на порядок меньше, чем при комнатной и более высоких температурах. Это говорит о том, что только на СВЧ, учитывая множитель f в формуле для P, можно получить достаточную для сушки и равномерно распределенную по объему мощность путем выбора рабочей частоты в пределах 800—2500 МГц. В данном случае применимы рекомендации по конструированию камер для СВЧ нагрева, справедливые при малых потерях в диэлектрике.

Чтобы уменьшить опасность пробоя конструкция камер должна быть такова, чтобы электрическое поле в продукте было максимальным, а в окружающем вакууме не превышало допустимого значения. В простейшем случае этого можно достигнуть, помещая подвергающиеся сушке продукты между широкими стенками прямоугольного волновода с волной H_{10} вблизи его продольной оси.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЧ НАГРЕВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИЩИ

В настоящее время СВЧ печи могут найти применение не только в общественном питании (рестораны, столовые, вагоны-рестораны), но и быту.

Приготовление мяса. Благодаря выделению тепла во всем объеме довести до готовности мясо в СВЧ печи можно всего лишь за 1—5 мин (в скороварке на это требуется 40 мин). Равномерное выделение тепла по объему каждого куска обеспечивает в приготовленном мясе отсутствие непроваренных или непрожаренных мест. Кроме того, при столь быстром прогреве не происходит вываривание соков, поэтому вкусовые качества получаются более высокими, чем при обычных способах готовки.

Размораживание мяса, фруктов и овощей. Замороженные продукты приобретают все большую популярность. Однако перед употреблением их необходимо разморозить, что требует длительного времени. После медленного размораживания их качество заметно ниже, чем у свежих продуктов. Чтобы представить выигрыш во времени при использовании СВЧ печей для размораживания, можно привести следующие данные по традиционным способам размораживания. Время оттаивания куска мяса массой 1,3 кг в холодильнике (мясо переложено из морозильной камеры в пространство с плюсовой температурой, близкой к нулю) 24 ч; при комнатной температуре 10—12 ч; при использовании вентилятора — 5—6 ч; в печи при 72°С или в проточной воде в водонепроницаемой упаковке 3—4 ч.

С помощью СВЧ нагрева разморозить фрукты и овощи можно за 1—3 мин. Это дает не только экономию времени, но и настолько улучшает качество размороженных овощей и фруктов, что они почти не отличаются от свежих.

Глубина проникания СВЧ поля в замороженное мясо увеличивается с 2,85 см при —1,1°С до 68,7 см при —51°С на частоте 1000 МГц и с 1,5 см при 1,1°С до 42,3 см при —51°С на частоте 3000 МГц. Хотя разница здесь не столь велика, все же считается, что более глубокий прогрев удается обеспечить на более низких частотах, т. е. при рабочей частоте вблизи 1000 МГц, особенно если размеры обрабатываемого продукта превышают 5 см по толщине.

Торговые автоматы. Широкое распространение в торговле получили автоматы для продажи, например, газированной воды и газет, находят применение на почтах и в гостиницах автоматы по продаже конвертов и открыток и т. д.

Одной из главных целей применения автоматики в торговле является возможность покупки товаров в любое время суток. Для непортящихся товаров, таких, как газированная вода, сигареты, газеты и пр., эта задача технически решена. Иное дело — автоматы для продажи скоропортящихся продуктов и тем более таких, которые желательно принимать в пищу в горячем виде. С применением СВЧ появилась возможность для проектирования и изготовления подоб-

ных автоматов. Потребности в таких автоматах, безусловно, есть: например, на вокзале можно было бы в любое время через несколько минут получить стакан горячего молока, кусок горячей отварной или жареной курицы.

Принцип торгового автомата для продажи холодных и нескоропортящихся пищевых продуктов известен и применяется в закусочных-автоматах: после опускания жетона или монеты заранее приготовленная порция продукта подается потребителю. При использовании СВЧ техники для создания автоматов по продаже горячих продуктов эта обычная схема должна быть дополнена двумя устройствами: холодильником для хранения продуктов и СВЧ печью, куда после опускания монеты или жетона должны подаваться порции продуктов и где за 1—3 мин производится не только их оттаивание, но и нагрев до необходимой температуры. Далее — обычная выдача порции потребителю. Холодильник и СВЧ печь — это уже хорошо отработанные элементы, так что теперь дело за конструкторами и технологами подобных автоматов.

Значительно более простыми могут быть торговые автоматы, которые выдают замороженные порции продуктов, а покупатель перед употреблением в пищу сам разогревает их в СВЧ печах, установленных в том же зале закусочной-автомата.

В описанных применениях СВЧ печей реализуются преимущества централизованного приготовления продуктов питания, при котором наиболее эффективно используется квалифицированный персонал, широко применяются механизация и автоматизация трудоемких процессов.

Питание в больницах. Пищеблоки крупных больниц обычно расположены в отдельных помещениях, и пока оттуда питание доставляется к постели больного, пища становится если не холодной, то чуть теплой. СВЧ печи позволяют преодолеть этот недостаток. Быстрый разогрев блюд можно вести вблизи каждой палаты. Особенно это важно в инфекционных отделениях больниц, где каждую порцию можно разогревать на бумажных тарелочках однократного использования.

Весьма перспективной представляется организация питания, при которой в больницах пища не готовится, а поступает со специализированных предприятий на склад больницы в виде замороженных или охлажденных порций, откуда персонал, обслуживающий больных питанием, их получает и разогревает в СВЧ печах непосредственно перед подачей больному. Подсчитано, что при такой организации экономится 18% средств на питание. А это означает, что на 18% можно увеличить расходы на продукты при одних и тех же ассигнованиях на питание.

СВЧ печи в быту. В последнее время, особенно в новых жилых домах вместо газа для приготовления пищи используется электричество. При этом снижается загрязнение воздуха, полностью устраняется опасность взрывов, но электрические плиты сравнительно медленно разогреваются и довольно долго остывают после выключения.

Следующий шаг по применению электричества в быту — широкое внедрение СВЧ печей. В последние годы ведущие фирмы США и Японии наладили массовый (с 1975 г. свыше 1 млн. шт. в год) выпуск бытовых плит, предназначенных для квартир и коттеджей. Они представляют собой комбинацию обычной трех-четырехконфорочной электроплиты с СВЧ печью. СВЧ печь может быть расположена как духовка под электроплитой или же над ней в виде шкафчика.

При широком использовании СВЧ печей в быту получает быстрое развитие и индустрия приготовления замороженных порционных блюд, специально предназначенных для быстрого оттаивания и разогрева в СВЧ печах. Так что в недалеком будущем хозяйки будут покупать порционные замороженные блюда, хранить их в морозильных камерах своих холодильников и подавать к столу в размороженном и разогретом в СВЧ печах виде через считанные минуты после извлечения из холодильника.

ЗАЩИТА ОТ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЙ

Во всех предыдущих параграфах были даны описания мощных СВЧ устройств, в которых генераторы высокочастотной энергии имели мощность около единиц киловатт в непрерывном режиме. Даже если небольшая часть этой мощ-

ности просачивается в окружающее установку пространство, это может представлять опасность для окружающих: воздействие достаточно мощного СВЧ излучения на зрение, нервную систему и другие органы человека может вызвать серьезные болезненные явления. Поэтому при работе с мощными источниками СВЧ энергии необходимо неукоснительно соблюдать требования техники безопасности.

В нашей стране установлена безопасная норма СВЧ излучения, т. е. так называемая санитарная норма — 10 мкВт/см². Она означает, что в месте нахождения обслуживающего персонала мощность потока СВЧ энергии не должна превышать 10 мкВт на каждый квадратный сантиметр поверхности. Эта норма взята с многократным запасом. Так, например, в США в 60-е годы была норма в 1000 раз большая — 10 мВт/см².

Следует отметить, что по мере удаления от мест излучения СВЧ мощности — от резонаторных камер или волноведущих систем, где производится обработка с помощью СВЧ энергии, — поток излученной энергии быстро ослабевает (обратно пропорционально квадрату расстояния). Поэтому можно установить безопасную границу, где уровень излучения ниже нормы, и выполнить ее в виде ограждения, за которое нельзя заходить во время выполнения технологического процесса. При этом защитные устройства получаются достаточно простыми и недорогими.

В бытовых СВЧ печах для предотвращения излучения через загрузочные люки, дверцы и крышки наиболее распространены контактные устройства в виде множества пружинок из листового материала, например бериллиевой бронзы БрБ2. Такие пружинки создают контакт для СВЧ токов по всему периметру загрузочного люка. Подобная система была применена в отечественной СВЧ печи типа «Волжанка», в ряде японских печей.

В настоящее время существует несколько видов как твердых, так и мягких (типа резины) поглощающих материалов, которые уже при толщине в несколько миллиметров обеспечивают практически полное поглощение просачивающейся СВЧ энергии.

Поглощающий материал закладывается в щели между теми металлическими деталями резонаторных камер или волноведущих структур, которые не могут быть соединены сваркой или пайкой.

Предотвращение излучения через отверстие для наблюдения или подачи воздуха осуществляется применением металлических трубок достаточно малого внутреннего диаметра и необходимой длины. Такие трубки являются запредельными волноводами и практически не пропускают СВЧ энергию. Необходимо, чтобы внутренний радиус трубки R был в 10—15 раз меньше рабочей длины волны. В этом случае погонное затухание (в децибелах на сантиметр) на низшем типе волны H_{11} может быть приблизительно определено по формуле $L = 16/R$, а общее затухание при длине трубки l становится равным $16l/R$ дБ.

Рассмотрим численный пример. Пусть рабочая длина волны $\lambda = 12{,}6$ см. Возьмем трубку с внутренним радиусом $R = 9$ мм. Пользуясь формулой для L, определим, что на каждом сантиметре длины трубки погонное затухание $L = 16/0{,}9 = 17{,}8$ дБ/см. Если мощность СВЧ колебаний резонатора составляет 1 кВт, а вне трубки будем считать допустимой мощность 1 мкВт, то на длине трубки l должно быть ослабление 1 кВт/1 мкВт $= 1/10^{-6} = 10^6$ раз, или 60 дБ. Длина трубки будет $l = 60/L = 60/17{,}8 = 3{,}37$ см.

Окончательно длину трубки с внутренним диаметром 18 мм можно принять равной 4 см. Как видим, безопасный уровень излучения может быть получен при не очень длинных трубках и при достаточно больших диаметрах.

Для промышленных установок СВЧ нагрева характерна необходимость многоразового открывания и закрывания люков загрузки, дверок и т. д. От этих операций защитные устройства, в особенности контактные, постепенно изнашиваются. Кроме того, с течением времени контактные поверхности окисляются. В результате излучение может возрасти в несколько раз и даже на один-два порядка. Поэтому необходимы систематическое наблюдение за состоянием защитных устройств, проведение периодических замеров уровня излучения. Отсюда и жесткие требования к надежности защитных устройств. Чтобы в эксплуатации нормы облучения не были превышены, заводские сдаточные нормы на излучение делают более жесткими. Так, в Японии допускается увеличение излучения

от заводских норм до эксплуатационных при количестве открываний дверцев более 100 тыс. раз. Собственно, при таких условиях и проводятся периодические заводские испытания защитных устройств.

СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Основные области применения СВЧ электроники малой мощности можно подразделить на четыре группы: измерение параметров и свойств веществ и материалов в технологических потоках; ближняя радиолокация; использование СВЧ излучения в аппаратуре и приборах для научных исследований в нерадиоэлектронных отраслях науки и техники; функциональные модули, предназначенные прежде всего для быстродействующих ЭЦВМ.

Методы измерения параметров веществ в СВЧ диапазоне. Эти методы можно разделить на две группы — методы измерения параметров специальных образцов и методы измерения параметров и свойств веществ в непрерывных технологических потоках. Иногда эти группы частично перекрываются.

Методы первой группы основаны на измерениях действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\varepsilon=\varepsilon'-j\varepsilon'')$ специально изготовленных образцов веществ. В методах второй группы для определения параметров веществ чаще используются измерения ослабления или набега фазы при прохождении излученных передающей антенной волн через объем вещества, в котором во время измерений частицы вещества меняются, например через измеритель непрерывно протягивается лента материала. В ряде случаев в методах второй группы параметры вещества можно определить и по коэффициенту отражения волн. Рассмотрим кратко эти методы.

Резонаторные методы. Обычно используются резонаторы цилиндрического типа с колебаниями вида E_{01n} или H_{01n}, возбуждаемые через отверстия связи с прямоугольным волноводом (рис. 49). Образец чаще всего имеет форму цилиндра малого диаметра по сравнению с длиной и диаметром резонатора, но длина образца равна длине резонатора.

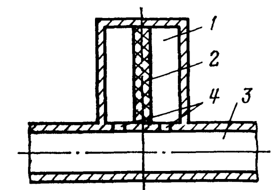


Рис. 49. Резонатор для измерения параметров вещества:

1 — резонатор; 2 — образец; 3 — прямоугольный волновод; 4 — отверстия связи резонатора с волноводом

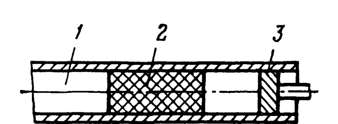


Рис. 50. Волноводный метод измерения параметров вещества:

1 — прямоугольный волновод; 2 — образец; 3 — короткозамыкающий поршень

Одна из главных особенностей метода заключается в том, что образец должен занимать малую часть объема резонатора. Интересно, что в случае малых потерь предпочтительно использовать колебания вида E_{01n}, так как в этом случае имеет место максимум электрического поля в образце, а следовательно, достигается наибольшая чувствительность при измерениях. При больших потерях выгоднее использовать колебания вида H_{01n}, так как при этом имеет место нулевое электрическое поле на оси резонатора, а значит, и в образце, отчего в целом чувствительность к большим потерям будет понижена.

Значения ε' и ε'' вычисляют по результатам измерения сдвига резонансной частоты $\Delta f_{рез}$ и уменьшению нагруженной добротности $\Delta Q_н$ резонатора при внесении в него образца вещества. Получается система двух трансцендентных

уравнений с двумя неизвестными ε′ и ε″. Эти уравнения упрощаются для случая очень малых или очень больших потерь. Труднее всего, когда $\operatorname{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon' = 0{,}1 \div 0{,}01$.

Для повышения точности, упрощения измерений и вычислений образцы должны иметь определенные форму и размеры.

Волноводные методы. Один из волноводных методов основан на измерении значения $K_{\text{ст}v}$ и величины смещения минимума стоячей волны при помещении образца вещества в виде параллелепипеда в прямоугольный волновод, замкнутый на конце с помощью короткозамыкающего поршня (рис. 50). Поперечное сечение образца должно быть точно равно размерам поперечного сечения прямоугольного волновода.

В другом методе при таком же образце измеряются ослабление (в децибелах) и фазовый сдвиг ($\Delta\varphi$) при прохождении волны H_{10} через образец.

Измерения в открытом пространстве являются по существу квазиоптическими измерениями. Для их выполнения могут быть применены открытые резонаторы, представляющие собой часть свободного пространства либо между передающим и приемным рупорами (рис. 51, *а*), либо между приемным рупором и отражающим зеркалом (рис. 51, *б*). В последнем случае возбуждение колебаний в открытом резонаторе осуществляется через полупрозрачную для электромагнитных волн пленку.

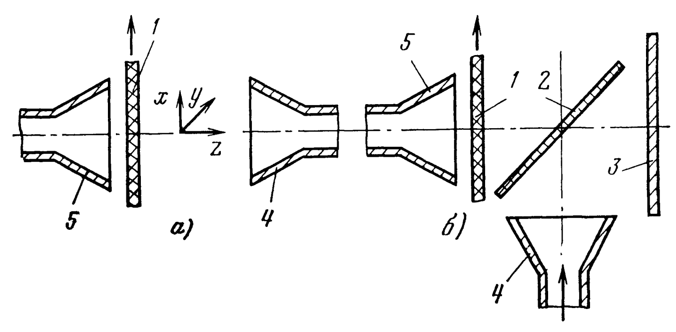


Рис. 51. Измерение параметров веществ в открытых резонаторах между возбуждающим и приемным рупорами (*а*) и между приемным рупором и плоским металлическим зеркалом (*б*):

1 — образец вещества; *2* — полупрозрачная для электромагнитных волн пленка; *3* — плоское металлическое зеркало; *4* — возбуждающий рупор; *5* — приемный рупор

Для измерений параметров веществ в открытом пространстве могут быть применены и нерезонансные методы. Схема измерений здесь такая же, как и на рис. 51, *б*. Отличие от открытого резонатора состоит в том, что как передающий, так и приемный рупоры должны быть хорошо согласованы со свободным пространством, в то время как в резонаторном методе для повышения добротности открытого резонатора используется слабая электромагнитная связь как при возбуждении резонатора, так и при снятии с него высокочастотного сигнала.

К образцам веществ предъявляются определенные требования. Если размеры образца по осям *x* и *y* (см. рис. 51, *а*) больше поперечных размеров пучка электромагнитных волн, то для повышения точности измерений надо с максимально возможной точностью выдерживать толщину образца. Если же поперечные размеры образца меньше, то у него должны быть точными не только толщина, но и размеры по осям *x* и *y*.

К аппаратуре и приборам, работающим при измерениях параметров в технологических потоках, предъявляются следующие требования. Во-первых, должен отсутствовать контакт с образцом. Это требование можно легко выполнить (см. рис. 51). Во-вторых, наиболее трудно выполнимым требованием является стабильность работы в течение длительного времени, измеряемого чис-

лом смен или даже суток. Так, например, мощность СВЧ генератора за сутки не должна изменяться более чем на 0,5%. Достигается это путем применения обратной стабилизирующей связи, когда в передающем тракте устанавливают направленный ответвитель, а снимаемый в боковое плечо СВЧ сигнал после детектирования используется для регулировки выходной мощности генератора.

Сложнее со стабилизацией генерируемой частоты, особенно при фазовых методах измерений. Обычное значение стабильности частоты 10^{-3}. При использовании специальных стабилизирующих высокодобротных резонаторов стабильность частоты составляет 10^{-4}. При фазовых же методах требуется стабильность частоты на уровне кварцевых генераторов 10^{-5}—10^{-6}. Приходится использовать задающие генераторы со стабилизацией кварцем на частотах в несколько мегагерц, а далее производить многократное умножение частоты с последующим усилением СВЧ сигнала до требуемого уровня (единиц — десятков милливатт).

Примеры измерения параметров и свойств веществ и материалов в технологических потоках. *Измерение влажности* — одна из важнейших проблем измерения параметров различных веществ, в частности, в пищевой промышленности и сельском хозяйстве.

Кроме химических методов сравнительно давно предложены метод сопротивления и емкостный метод. При методе сопротивления измеряется омическое сопротивление по всей толщине продукта, зависящей, как известно, от процентного содержания влаги. При емкостном методе на частоте около 1 МГц измеряется емкость конденсатора, между обкладками которого расположена порция исследуемого вещества. Недостаток обоих методов — высокая погрешность измерений, вызванная значительным влиянием на получаемые результаты различных примесей.

Так при измерении влажности маргариновой эмульсии на показания емкостного измерителя оказывает влияние концентрация поваренной соли (рис. 52, *б*), а при методе сопротивления зависимость сопротивления R как функция влажности имеет несколько ступеней, на которых $R \approx \text{const}$ при разных значениях процента влажности (рис. 52, *а*). В результате вместо градуировочной кривой *1* имеем градуировочную область *2* (рис. 52, *в*), границы которой определяются примесями и флуктуациями структуры измеряемого вещества.

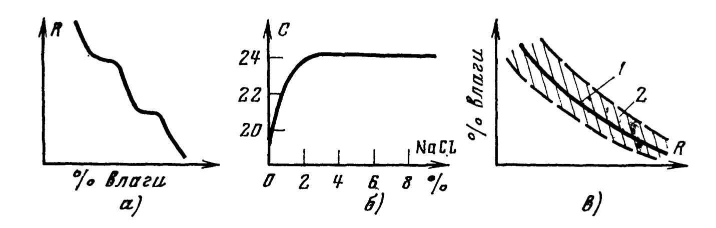


Рис. 52. Зависимость сопротивления образца от влажности (*а*); зависимость емкости от концентрации поваренной соли в образце (*б*) и зависимость сопротивления образца от влажности при методе сопротивления (*в*)

СВЧ измеритель влажности обладает высокой чувствительностью — обычно 0,1%, но можно получить чувствительность и 0,0001%, необходимую, например, при измерениях влажности самолетных топлив, для которых допустимым уровнем влажности является 0,001%. Главные достоинства СВЧ измерителя — малая чувствительность к примесям и отсутствие необходимости в непосредственном контакте с веществом. Ведь даже в емкостном измерителе необходим механический контакт измеряемого вещества с обкладками, а это приводит к тому, что при непрерывных технологических процессах емкостные датчики постепенно и довольно быстро забиваются пылью, смолой, парафином и другими веществами.

Принцип работы СВЧ измерителя влажности основан на измерении величины потерь между передающей и приемной антеннами (в децибелах) при прохождении излученных волн через объем, занимаемый измеряемым веществом.

Высокая точность метода определяется сильным влиянием на величину ослабления даже ничтожных примесей воды в миллиметровом диапазоне волн. Известен, например, измеритель влажности с рабочей длиной волны 7 мм.

СВЧ метод допускает регулировку чувствительности путем «накопления вещества», если разнести передающую и приемную антенны и увеличить объем вещества между ними. При фазовом методе измерений растет набег фазы в материале, а следовательно, повышается чувствительность метода. При емкостном методе этого сделать не удается, так как при увеличении расстояния между обкладками возрастает влияние краевого эффекта, что не дает возможности уменьшить погрешность или повысить чувствительность.

Измерение параметров ленточных материалов. В качестве примера рассмотрим определение содержания ацетона после сушки стеклоленты, пропитанной эпоксидной смолой, разведенной на ацетоне. Ацетон вызывает интенсивное поглощение электромагнитной энергии, достигающее (20—30) дБ/мм при рабочей длине волны, равной 7 мм.

Разрабатывая установку для подобных измерений, конструкторы провели сравнение нескольких конструктивных решений. Так, при протягивании ленты через щели в прямоугольном волноводе, прорезанные посередине широких стенок, установка выходила из строя примерно через 1 ч из-за того, что щель забивалась ворсинками, пылью, смолой. Расширение щели приводило к излучению через нее и к механическим колебаниям ленты, что тоже снижало точность измерений.

Наилучшим оказалось применение измерителя с использованием открытого пространства (см. рис. 51, *а*). При этом важно выбрать ориентацию ленты в пространстве между рупорами. Если поверхность ленты располагается в плоскости yz, то имеет место максимальное ослабление сигнала между рупорами, однако дрожание и небольшие перемещения ленты в направлении осей x и z изменяют отражение волн от нее, что приводит к увеличению погрешности измерений. При расположении ленты к плоскости xy, как изображено на рис. 51, *а*, потери минимальны, но здесь дрожание ленты в направлении оси z приводит к изменению отражений. Наилучшей оказалась ориентация ленты под углом 45° к плоскости раскрыва рупоров подобно тому, как на рис. 51, *б* ориентирована полупрозрачная пленка. При такой ориентации лента протягивается в направлении оси y. В данном случае отраженные от ленты волны уже не попадают ни в передающий, ни в приемный рупоры и не влияют на результат измерений.

В рассматриваемом измерителе генерируемая мощность — несколько милливатт. При мощности свыше 100 мВт уровень излучения становится выше допустимой нормы. Кроме того, происходит нагрев ленты. Поэтому, если необходимо измерять большие величины ослабления, следует увеличивать чувствительность приемного устройства. Для этого вместо рупорных антенн, облучающих материал практически по всей ширине ленты, следует использовать рупорно-линзовые антенны, фокусирующие электромагнитные волны в пятно диаметром $(2—3)\lambda$, расположенное посередине между передающей и приемной антеннами. В этом случае параметры ленты определяются на небольшом участке ее ширины. Ориентация ленты относительно плоскости раскрыва рупоров примерно такая же, как и в предыдущем случае. Угол наклона следует экспериментально подобрать вблизи 45°.

Измерение толщин (толщинометрия). Преимущества использования СВЧ техники становятся особенно ощутимыми, когда нет доступа к внутренней сто-

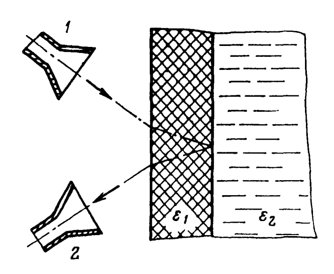


Рис. 53. Схема измерения толщины кирпичной стенки с диэлектрической постоянной ε_1 стекловаренной печи:

1 — передающая рупорная антенна; 2 — приемная рупорная антенна

роне диэлектрической стенки. Примером может служить измерение толщины стенок стекловаренных печей без их остановки. В таких печах варка стекла идет непрерывно в течение нескольких смен подряд, и при этом происходит постепенное растворение стенок. Непрерывный контроль их толщины позволяет остановить печь, когда толщина стенок достигает минимально допустимого значения.

Схема измерений приведена на рис. 53. Измерения основаны на использовании разницы в значениях диэлектрической проницаемости в кирпичной стенке ε_1 и в расплавленном стекле ε_2. По мере уменьшения толщины принимаемый сигнал меняется по синусоидальному закону с постепенно увеличивающейся амплитудой, так как потери в кирпиче значительны и существенно больше, чем в стекле. Период синусоиды соизмерим с половиной рабочей длины волны. Его можно сопоставить с изменением толщины стенки и тем самым проградуировать СВЧ толщиномер.

ТЕЛЕВИДЕНИЕ И СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА

РАЗВИТИЕ СЕТИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

К 1977 г. около 80% населения нашей огромной страны имели возможность смотреть телевизионные передачи, причем, как правило, и программу Центрального телевизионного вещания из Москвы в цветном изображении.

Напомним, почему на обычный телевизионный приемник нельзя принимать телепередачи на любом расстоянии от телевизионного центра.

Современный телевизор может принимать сигналы изображения и звукового сопровождения в любом из 12 телевизионных каналов в метровом диапазоне волн. В телевизорах последних моделей предусмотрена возможность приема телевизионных сигналов в дециметровом диапазоне волн, где значительно меньше помех, а антенные системы получаются малогабаритными.

Метровые, дециметровые и более короткие волны СВЧ диапазона слабо огибают землю, поэтому прием телевизионных сигналов возможен на расстояниях от передатчика лишь, немного больших, чем расстояние прямой видимости передающей антенны. Поэтому чем выше поднята антенна телецентра, тем больше зона уверенного приема телевизионных сигналов. Когда антенны Московского телецентра были расположены на Шуховской башне высотой 150 м, зона уверенного приема (без применения специальных остронаправленных приемных антенн и антенных усилителей) была равна 70—100 км. На Останкинской телебашне передающие антенны расположены на высоте свыше 500 м, т. е. в 3 раза с лишним выше, но расстояние уверенного приема увеличилось менее чем в 3 раза и составляет теперь 150—180 км. Таковы законы геометрии. Если считать радиус действия Останкинского телецентра равным 150 км, то он обслуживает территорию площадью 71 000 кв. км. Площадь же территории нашей страны 22 млн. кв. км. Таким образом, для 100%-ного охвата населения с учетом необходимого перекрытия зон действия потребовалось бы строительство около 300 телецентров как Останкинский.

Дальнейшее увеличение высоты телевизионных антенных башен экономически нецелесообразно — слишком мал прирост площади обслуживания по сравнению в возрастающими техническими трудностями и экономическими затратами при возведении более высоких сооружений, чем Останкинская телевизионная башня.

В 50-е годы распространение телевизионного вещания шло двумя путями: созданием сети местных телецентров и передачей телевизионных программ из Москвы и других городов по многоканальным кабельным и радиорелейным линиям. Каждая промежуточная станция радиорелейной линии может быть использована как местный «пассивный» телецентр. Переданные по радиорелейной линии на сантиметровых волнах телевизионные сигналы преобразуются по частоте в соответствующий стандартный телевизионный канал метрового диапазона, усиливаются и излучаются самостоятельной антенной метрового диапазона волн, установленной на той же башне высотой 70—100 м промежуточной радиорелейной станции. Зона действия ее обычно имеет радиус 50—70 км. Таким образом, вдоль магистральных радиорелейных и кабельных линий создавались

полосы шириной 100—150 км надежного приема центрального телевизионного вещания.

Как правило, радиорелейные и кабельные линии прокладываются по густонаселенным районам, поэтому уже к 50-м годам примерно 50% населения нашей страны могло регулярно смотреть телевизионные передачи.

Еще в 40—50-е годы ученые мечтали о подъеме телевизионных передающих антенн в космос. Тогда зона прямой видимости и зона уверенного приема составили бы сотни и даже тысячи километров. Но просторы нашей страны еще больше — свыше 10 тыс. км.

Сегодня же космические системы телевизионного вещания стали повседневной реальностью. Однако и здесь оказалось, что одной универсальной системой обойтись нельзя, а надо идти по пути сочетания оптимального применения нескольких систем и традиционных способов дальней передачи телевидения по радиорелейным и кабельным линиям.

Задача комплексного 100%-ного обеспечения населения Советского Союза на всей его огромной территории потребовала создания и развития по меньшей мере трех систем космического телевизонного вещания. Эти системы получили наименование «Орбита», «Экран» и, наконец, системы, предусматривающие разработку новых телевизионных приемников для непосредственного прямого приема телевидения с искусственных спутников Земли. Необходимо подчеркнуть, что в системах «Орбита» и «Экран» прием телевидения в отдаленных районах нашей страны ведется на обычные стандартные телевизоры черно-белого и цветного изображения.

Начало 10-й пятилетки ознаменовалось новым качественным скачком в развитии телевизионного вещания в нашей стране.

Жители большого числа городов и населенных пунктов получили возможность смотреть две цветные программы Центрального телевидения. Это достигнуто за счет широкой реконструкции радиорелейных линий, разработки и внедрения новой многоканальной аппаратуры для магистральных кабельных линий и дальнейшего быстрого развития систем космической связи.

Так, к 1976 г. протяженность телевизионных стволов радиорелейных и коаксиальных кабельных линий в нашей стране превышала 150 тыс. км, более двух третей из них приходилось на долю магистральных линий.

Новая аппаратура для кабельных линий К-3600 предназначена для передачи по коаксиальному кабелю на расстояние до 12 500 км телефонной, телеграфной, телевизионной, фототелеграфной и другой информации. Она позволяет одновременно вести телефонные переговоры 7200 абонентам. Комплекс этой аппаратуры состоит из оконечных станций, обслуживаемых и необслуживаемых усилительных устройств.

Рост телевидения в СССР иллюстрирует табл. 2.

Таблица 2

Рост телевидения в СССР

Количество передающих станций и телевизоров	1955 г.	1975 г.	1977 г.
Передающие станции всего, в том числе:	18	1957	2093
программные телецентры	12	130	130
мощные ретрансляционные станции	1	239	266
маломощные ретрансляционные станции	5	1588	1697
Станции «Орбита»	0	69	72
Телевизоры, млн. шт.	0,819	55,2	—

Большинство программных телецентров и мощных ретрансляционных станций имеет выходную мощность от 5 до 50 кВт, а маломощные ретрансляторы — от 2 до 100 Вт.

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА «ОРБИТА»

В начале 1965 г. в нашей стране был запущен первый специализированный спутник связи «Молния-1», предназначенный для передачи телевидения и многоканальной связи через космос. 23 апреля 1965 г. была проведена первая опытная передача телевизионной программы во Владивосток и обратно. Через полгода была осуществлена цветная телепередача из Москвы в Париж.

24 октября 1967 г., накануне празднования 50-летия Великого Октября, вступила в строй Общесоюзная радиотелевизионная передающая станция, размещенная в Останкинской телебашне высотой вместе с антеннами 537 м. Сеть первых 20 наземных приемных станций «Орбита» была пущена в эксплуатацию всего 9 дней спустя — 2 ноября 1967 г.

Трансляция из Москвы на приемные пункты системы «Орбита» осуществлялась через спутник связи «Молния-1», выведенный на высокоэллиптическую орбиту с апогеем 40 000 км в Северном полушарии и периодом обращения вокруг Земли 12 ч. Зона радиовидимости этого спутника охватывала всю территорию Советского Союза, а работа бортовых средств связи велась в дециметровом диапазоне волн.

К началу 10-й пятилетки сеть приемных станций «Орбита» была расширена до 69, а к 1 января 1977г. — до 72 станций, расположенных в наиболее удаленных от Москвы, но сравнительно густонаселенных районах нашей страны. Благодаря этому к 1976 г. телевизионным вещанием в нашей стране уже было охвачено почти 80% населения, но только 1/5 площади территории Советского Союза.

В системе космической связи «Орбита» антенна передающей станции и все антенны приемных станций должны иметь следящие устройства, необходимые для слежения за спутником связи. Для улучшения шумовых характеристик передачи (повышения отношения сигнал/шум на приемной стороне) все антенны должны быть остронаправленными. По мере углового движения спутника по небосклону устройства автоматики все время поворачивают антенны так, чтобы максимум диаграммы направленности был направлен на спутник.

С другой стороны, чтобы ретранслируемые сигналы охватывали возможно большую территорию, передающая антенна на спутнике не должна быть слишком остронаправленной. Ее диаграмма направленности должна иметь один довольно широкий лепесток, ориентированый на Землю.

Долгое время работы на орбите, измеряемое годами, требует, во-первых, предельно высокого срока службы электровакуумных приборов (около 100 000 ч и более). Во-вторых, на спутнике связи должна быть установлена система ориентации на Землю и двигательная установка для коррекции орбиты. В-третьих, на спутнике должна быть надежная система энергопитания от солнечных батарей.

Для космической связи важен выбор частот. Радиоволны к спутнику и обратно должны проходить не только большие расстояния (более 70 000 км), но и преодолевать ионосферу и нижние слои атмосферы (тропосферу), насыщенные водяными парами. Ионосфера представляет собой ионную плазму с плотностью, превышающей 10^6 электронов в 1 см^3.

Выбор рабочих частот определяется необходимостью иметь не только минимальное ослабление сигнала при распространении, но и минимальный уровень внутренних шумов приемников, космических шумов и шумов Солнца, тепловых шумов атмосферы и Земли.

Конструкция и схема передатчика для спутника должны быть выбраны так, чтобы получить в сочетании высокий к.п.д. и минимальную массу. Удовлетворить этим требованиям можно только на частотах от 1000 до 10 000 МГц ($\lambda = 30 \div 3$ см). В 1963 г. на X пленарном заседании Международного консультативного комитета по радиосвязи в Женеве было принято решение рекомендовать для спутниковых систем связи диапазоны частот, близкие к 4000 и 6000 МГц ($\lambda = 7{,}5$ и 5 см соответственно).

24 ноября 1971 г. на высокоэллиптическую орбиту был запущен усовершенствованный спутник связи «Молния-2», обеспечивающий работу наземных приемных станций «Орбита». Чтобы снизить взаимные помехи, прием и передача сигналов на спутнике ведутся на существенно различных частотах. Так на спутнике связи «Молния-2» эти частоты расположены в диапазонах 4 и 6 ГГц.

Орбиты спутников связи. Форма орбит может быть эллиптической и круговой. Эллиптическая орбита имеет две характерные точки: апогей — наиболее удаленная от поверхности Земли, и перигей — наиболее близкая. Прямая линия через эти две точки является большой осью эллипса. Она проходит и через центр Земли, который расположен в одном из фокусов эллипса. Линейная скорость спутника вблизи апогея значительно меньше, чем вблизи перигея. Это удобно тем, что угловая скорость перемещения спутника относительно неподвижного наблюдателя на Земле получается небольшой, так что остронаправленные антенны могут без особого труда следить за его движением.

В зависимости от угла наклона плоскости орбиты к плоскости экватора можно подразделить эллиптические орбиты на экваториальные, когда плоскости орбиты и экватора совпадают, и полярные, когда эти плоскости взаимно перпендикулярны. Если же этот угол наклона больше нуля, но меньше 90°, то такие орбиты называются наклонными.

Орбиты спутников «Молния-1» являются эллиптическими наклонными. Плоскость орбиты наклонена к плоскости экватора под углом около 65° (рис. 54). Именно при таком угле условия связи в пределах Евразии наилучшие. Апогей орбиты около 40 000 км расположен в Северном полушарии, а перигей высотой около 500 км — в Южном. Период обращения спутника равен 12 ч. На первом витке в течение каждых суток примерно 9 ч поддерживается связь между любыми пунктами на территории СССР, а на втором витке — в течение 3 ч возможна устойчивая связь между Европейской частью СССР и Центральной и Северной Америкой.

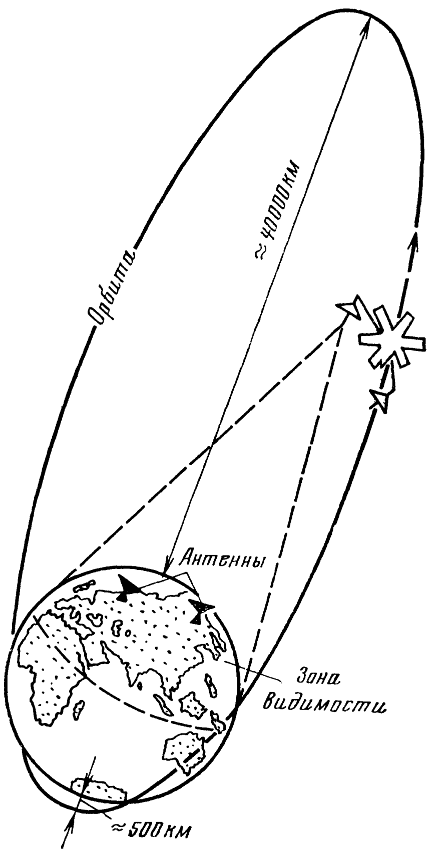


Рис. 54. Орбита спутника связи «Молния-1»

Круглосуточная связь в пределах Советского Союза возможна, если иметь на соответствующих эллиптических наклонных орбитах три спутника типа «Молния».

Если спутник связи запущен на экваториальную круговую орбиту с периодом обращения 24 ч, то наблюдателю на Земле он кажется неподвижно «висящим» в небе. Такой спутник связи называется геостационарным. Он используется в системе связи «Экран», рассматриваемой далее. Стационарный спутник наиболее выгоден для связи, так как с его помощью можно осуществить связь не только на максимально возможных расстояниях, достигающих 18 тыс. км, но и можно существенно упростить наземные антенные системы. Антенные системы могут быть неподвижными и «нацеленными» своим главным лепестком диаграммы направленности на спутник.

Высота круговой экваториальной орбиты над поверхностью Земли приблизительно равна 36 тыс. км, что обеспечивает надежную связь примерно до 72° северной и южной широты и примерно в пределах ±75° долготы относительно долготы расположения стационарного спутника на орбите.

Рассмотрим кратко линию передачи телевидения и связи от Москвы до приемной станции системы «Орбита». На этой линии работают приемно-пере-

дающая наземная станция, расположенная в Подмосковье, ретранслятор на спутнике связи типа «Молния» и приемные станции «Орбита», размещенные в Восточных и Северных районах СССР, а также в Средней Азии.

Московская приемно-передающая наземная станция системы «Орбита» расположена не в Москве, а в Подмосковье с тем, чтобы уменьшить уровень помех как при передаче, так и в особенности при приеме сигналов со спутников связи. Ведь через эту станцию не только передаются программы Центрального телевидения, но и идет прием ретранслируемых спутником сигналов многоканальной связи и телевизионных передач, направляемых в Москву из дальних городов и стран.

Настройка передающей аппаратуры и проверка всего тракта от передатчика до большинства приемных станций «Орбита» проводятся с помощью специального измерительного сигнала, передаваемого через спутник связи на приемную сеть станции «Орбита».

На приемно-передающей станции, на спутниках связи и на всех приемных станциях «Орбита» есть резерв всего основного оборудования. Поэтому так редки перерывы в телевизионных передачах в любом самом дальнем уголке нашей страны. Поступающие с Останкинского телецентра сигналы изображения и звукового сопровождения модулируют несущую частоту (соответствующая ей длина волны принадлежит дециметровому диапазону волн для спутников связи «Молния-1» или сантиметровому диапазону для спутников связи «Молния-2» и «Молния-3»). Полоса частот вблизи несущей при частотной модуляции составляет 15 МГц. Самым важным на этом этапе преобразования сигнала является временно́е уплотнение сигналов изображения сигналами звукового сопровождения. Сигналы звукового сопровождения преобразуются в серию импульсов, которые передаются в интервалы времени обратного хода луча при развертывании изображения. В результате и звук, и изображение модулируют по частоте несущую передатчика совместно, т. е. передаются по одному и тому же каналу связи. А это, в свою очередь, гарантирует практически идеальную синхронность изображения и звукового сопровождения на приемных станциях, как бы далеко от передатчика они не находились.

Разработка и внедрение аппаратуры для временно́го уплотнения сигнала изображения сигналами звукового сопровождения понадобились после того, как во время опытных передач в 1965 г. через спутник «Молния-1» из Москвы во Владивосток обнаружилось заметное расхождение изображения и звука. Сигналы изображения передавались через спутник (путь, примерно равный

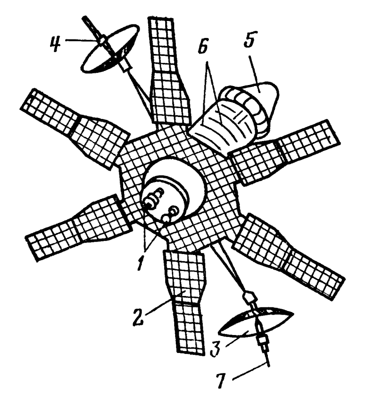


Рис. 55. Общий вид спутника связи «Молния-1»:

1 — датчики ориентации; *2* — солнечные батареи на выносных панелях; *3*, *4* — направленные антенны; *5* — двигатель для коррекции орбиты; *6* — радиатор-охладитель; *7* — датчик ориентации антенны на Землю

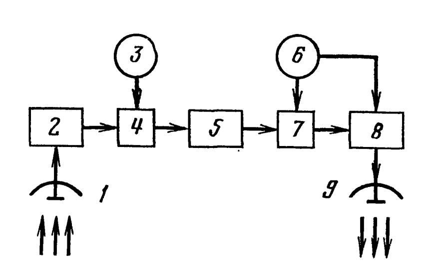


Рис. 56. Упрощенная функциональная схема ретранслятора спутника связи «Молния-1»

80 000 км), а звуковое сопровождение — по наземным каналам связи (около 10 000 км).

Спутник связи «Молния». Общий вид спутника связи «Молния-1» показан на рис. 55. Его приемная и передающая антенны ориентированы на Землю. Упрощенная функциональная схема приемопередатчика (ретранслятора) показана на рис. 56. Сигналы, переданные с Земли, принимаются приемной антенной *1* и поступают на вход чувствительного приемника *2* и далее на первый преобразователь частоты *4*, на который также поступают колебания от гетеродина *3*. Далее сигналы промежуточной частоты усиливаются с помощью УПЧ *5* и подаются на второй преобразователь частоты *7*, на который поступают колебания от второго гетеродина *6*, существенно отличные по частоте от колебаний первого гетеродина *3*. В результате излучаемый и принимаемый СВЧ сигналы будут так различаться по частоте, что они практически не влияют друг на друга.

После второго преобразователя частоты осуществляется усиление мощности СВЧ сигнала. В качестве усилителя выбрана лампа бегущей волны, для которой характерны широкая полоса, большой коэффициент усиления и достаточно высокий к.п.д. при использовании рекуперации. Ее мощность на выходе в непрерывном режиме составляет 40 Вт. ЛБВ является самым большим по массе и габаритам электровакуумным прибором на борту спутника. Для существенного снижения массы ЛБВ применено необычное и непривычное техническое решение — отказ от стеклянной герметизирующей оболочки-баллона лампы, так как в космосе вакуум значительно лучше, чем в большинстве современных электровакуумных приборов.

Подавляющее большинство радиотехнических схем на борту спутника собрано на полупроводниковых приборах с максимальным использованием микросхем и других методов микроминиатюризации.

Кроме ретранслятора на спутнике размещено большое количество вспомогательной аппаратуры: телеметрической, командной, энергопитания, терморегулирования на борту и т. д.

Телеметрическая система работает непрерывно. Сигналы, поступающие от датчиков температуры, давления и т. п. уже в виде электрических сигналов поступают на шифратор, где кодируются и с помощью передатчика и передающей антенны на сверхвысоких частотах излучаются на Землю. Эти сигналы используются на Земле для первоначального обнаружения спутника после запуска и после ежедневного вхождения в зону радиовидимости наземной станции. После настройки наземной передающей антенны на спутник подается команда на включение ретранслятора. В дальнейшем точное слежение передающей антенны за спутником осуществляется по сигналам специального передатчика.

Основным источником электроэнергии на спутнике являются солнечные батареи, которые, как видно на рис. 56, расположены на шести выносных панелях и состоят из нескольких тысяч кремниевых фотоэлементов. Для существенного повышения эффективности работы солнечных батарей используются устройства автоматики, ориентирующие батареи на Солнце.

Для периодической корректировки орбиты спутника на его борту имеется двигательная установка, включаемая по мере надобности по команде с Земли.

Кроме рассмотренной аппаратуры на спутнике связи имеется программно-вычислительное устройство для управления аппаратурой по имеющейся на борту программе или по командам с Земли.

С целью повышения надежности на спутнике связи «Молния-1» установлено три ретранслятора — один рабочий и два резервных.

Приемные станции «Орбита». Зеркало антенны представляет собой параболоид вращения диаметром 12 м, выполненный из алюминиевого сплава. Масса зеркала 5,5 т, а вместе с опорно-поворотными устройствами 50 т.

Упрощенная функциональная схема малошумящего входного устройства приемной станции «Орбита» показана на рис. 57. На общей функциональной схеме станции (рис. 58) она занимает квадрат под номером *6*.

Малошумящее входное устройство *6* является основным устройством приемной системы. Чем ниже уровень шумов приемника, тем при одном и том же качестве изображения можно либо уменьшить диаметр раскрыва антенны, либо уменьшить мощность передатчика на спутнике связи. Шумы, как известно,

приводят к ухудшению качества принимаемого изображения, к снижению предельной чувствительности всей приемной системы. Наибольшее значение, а следовательно, и наибольший вклад в шумы системы вносят внутренние шумы приемника и шумы системы, которые характеризуются коэффициентом шума системы или действующей шумовой температурой. Чем ниже уровень шума, тем соответственно меньше коэффициент шума и шумовая температура.

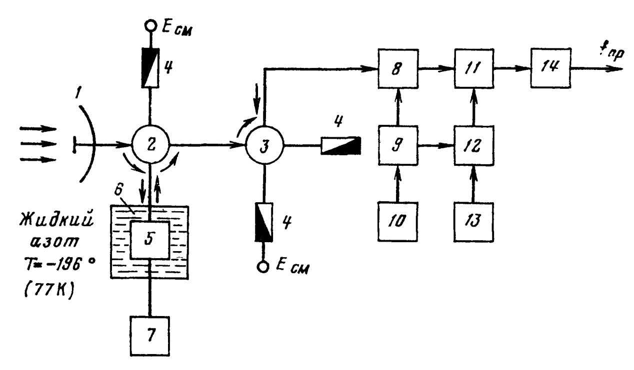


Рис. 57. Упрощенная функциональная схема входного устройства приемной станции «Орбита»:

1 — приемная антенна; *2* и *3* — циркуляторы; *4* — согласованные нагрузки; *5* — параметрический усилитель (первый каскад); *6* — криостат с жидким азотом; *7* и *10* — генераторы накачки; *8* — параметрический усилитель (второй каскад); *9* — направленный ответвитель; *11* — балансный смеситель; *12* — смеситель сдвига; *13* — гетеродин; *14* — предварительный усилитель промежуточной частоты.

В приемных станциях системы «Орбита» применены малошумящие двухкаскадные параметрические усилители, охлаждаемые жидким азотом, так что действующая шумовая температура приемного устройства равна всего лишь 60—70 К при полосе пропускания усилителей 15 МГц (напомним, что полоса видеочастот телевизионного канала равна 8 МГц).

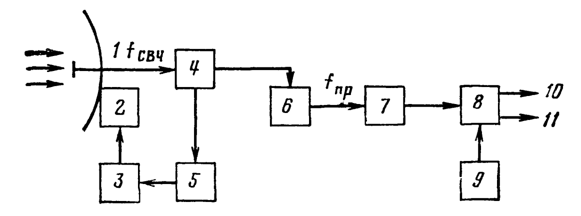


Рис. 58. Функциональная схема приемной станции «Орбита»:

1 — приемная антенна и волноводный тракт; *2* — приводные механизмы приемной антенны; *3* — аппаратура наведения приемной антенны на спутник связи; *4* — направленный ответвитель; *5* — аппаратура контроля приема; *6* — малошумящее входное устройство; *7* — основной усилитель промежуточной частоты; *8* — аппаратура разделения сигналов изображения и звукового сопровождения; *9* — аппаратура контроля изображения и регенерации синхросмеси; *10* — видеосигнал; *11* — сигнал звукового сопровождения

Чтобы ярче представить, как действующая шумовая температура влияет на конструктивные параметры приемной станции, приведем такой пример: одно и то же высокое качество сигналов изображения и звука может быть получено при действующей шумовой температуре приемника 70 К (примерно при —200°С)

и диаметре приемной антенны 12 м, как это сделано на приемных станциях «Орбита», в то время как при комнатной шумовой температуре 300 К потребовался бы диаметр антенны уже 30 м. Если бы действующая шумовая температура составляла 5 К, что можно сделать путем охлаждения жидким гелием не только входного усилителя, но и элементов схемы вблизи него (это так называемое интегральное криогенное приемное устройство), то зеркало антенны имело бы в диаметре всего лишь 5 м.

Как видно из рис. 57, во входном устройстве применен двухкаскадный параметрический усилитель с коэффициентом усиления 20—30 дБ. Первый каскад — регенеративного типа. Он работает по схеме «на отражение», т. е. выходная частота усиленного сигнала равна его входной частоте. Как отмечалось, для эффективного снижения шумов усилителя применено охлаждение жидким азотом, температура которого равна —196°С. Криостат емкостью 21 л выполнен со столь эффективной теплоизоляцией, что добавлять азот приходится только через 14—15 дней.

Второй каскад параметрического входного усилителя — преобразовательного типа и работает он при комнатной температуре. Усилитель не чувствителен к изменению частоты генератора накачки из-за двойного преобразования частоты: промежуточная частота остается постоянной. Второй каскад требует небольшой степени регенерации, и его общего усиления 18—20 дБ достаточно для значительного перекрытия шумов балансного смесителя и предварительного усилителя промежуточной частоты.

Если входной каскад усилителя установить непосредственно на приемной антенне, то удалось бы исключить шумы волноводного тракта, но значительно возросли бы трудности обслуживания криостата на поворотной площадке антенны. На приемных станциях «Орбита» принято другое решение: несколько ухудшить шумовые характеристики, но все же сделать волноводный тракт от антенны до аппаратного зала достаточно протяженным, а входное приемное устройство расположить в верхней части аппаратного зала. При такой конструкции действующая шумовая температура увеличивается на 15—20 К по сравнению со случаем расположения криостата непосредственно на приемной антенне.

Далее с выхода параметрического усилителя сигнал проходит балансный смеситель, предварительный УПЧ (см. рис. 57) и основной усилитель промежуточной частоты (см. рис. 58), усиливаясь примерно на 30 дБ. Затем следует детектор частотно-модулированного сигнала, входящий в аппаратуру разделения сигналов изображения и звукового сопровождения (см. рис. 58).

При внезапном уменьшении уровня принимаемого сигнала или при резком возрастании уровня помех вместо основного ЧМ детектора включается специальный помехоустойчивый демодулятор частотно-модулированных сигналов, который также имеется в приемной аппаратуре. Это синхронный фазовый детектор с обратной связью по частоте. Он не только улучшает пороговые свойства приемника при тепловых шумах, но и существенно подавляет импульсные помехи, в особенности от других радиосредств (например, пролетающих вблизи самолетов).

Из аппаратуры разделения сигналов изображения и звукового сопровождения (см. рис. 58) дальнейшая передача сигналов, включая синхроимпульсы по коаксиальному кабелю или по однопролетной радиорелейной линии, осуществляется на местный телецентр или мощную радиотрансляционную станцию (РТС).

На местном телецентре или РТС производятся модуляция несущей в одном из стандартных телевизионных каналов и обычная передача телевидения на всю сеть телевизоров в зоне обслуживания.

Телевизионные каналы дециметрового диапазона волн. В последнее время число телецентров и мощных ретрансляционных станций настолько возросло, что выделять новым вводимым в строй станциям один из 12 телевизионных каналов в метровом диапазоне волн стало все труднее из-за взаимных помех между ними. Так как все участки метрового диапазона еще в 60-е годы были полностью заняты, было решено использовать для новых телевизионных каналов отдельные участки дециметрового диапазона волн, т. е. часть телевизионного вещания перевести в диапазон УВЧ. На этих участках размещены разрешенные для использования телевизионные каналы, приведенные в табл. 3.

Следует особо подчеркнуть, что по сравнению с метровыми волнами на дециметровых не только резко уменьшаются габариты приемных антенн, но, что более важно, уменьшается уровень помех, а прием телевизионных передач становится более высококачественным.

Таблица 3

Телевизионные каналы дециметрового диапазона волн

№ канала	Полоса частот телевизионного канала, МГц	Несущая частота изображения, МГц	Несущая частота звукового сопровождения, МГц
21	470 — 478	471,25	477,75
22	478 — 486	479,25	485,75
27	518 — 526	519,25	525,75
28	526 — 534	527,25	533,75
29	534 — 542	537,25	541,75
30	542 — 550	543,25	549,75
31	550 — 558	551,25	557,75
32	558 — 566	559,25	565,75
33*	566 — 574	567,25	573,75
34	574 — 582	575,25	581,75
39	614 — 622	615,25	621,75

* Канал 33 с 1969 г. используется для передачи 5-й программы Центрального телевидения.

Развитие космической системы связи через пункты «Орбита». С 1 января 1977 г. сеть наземных приемных станций «Орбита» разделена на четыре группы. Антенны каждой из групп работающих в данное время станций «Орбита» ориентированы на один из спутников связи типа «Молния». Кроме спутника «Молния-2» был запущен спутник «Молния-3», а 22 декабря 1975 г. — новый спутник связи «Радуга» (его международный регистрационный индекс «Стационар-1») на экваториальную круговую (называемую еще геостационарной) орбиту.

На спутнике связи «Радуга» установлена усовершенствованная многоствольная бортовая аппаратура, предназначенная для круглосуточной телефонно-телеграфной связи и одновременной передачи цветных и черно-белых программ Центрального телевидения на сеть приемных станций «Орбита».

В результате телезрители Восточной Сибири и Дальнего Востока получили возможность смотреть первую программу Центрального телевидения, ориентированную во времени на часовой пояс Хабаровска, телезрители Центральной Сибири — на часовой пояс Красноярска, телезрители Западной Сибири и Средней Азии — на часовой пояс Новосибирска. А в Северные районы европейской части страны, частично в Западную Сибирь и Среднюю Азию одновременно с первой программой по часовому поясу Москвы или Новосибирска подается и вторая программа телевидения из Москвы.

Перевозимые станции космической связи типа «Марс». В последние годы мы имеем возможность смотреть телевизионные передачи с других материков и даже с противоположного полушария Земли. Раньше подобные передачи шли либо в видеозаписи, либо прямая трансляция велась по радиорелейным или кабельным линиям. Но эти линии есть далеко не везде. Существенно расширили возможность дальнего телевизионного вещания советские перевозимые станции космической связи типа «Марс».

Первая передача с помощью этой станции была организована из г. Дели в ноябре 1973 г. во время визита советской партийно-правительственной делегации в Индию. В мае 1975 г. была введена в строй усовершенствованная станция «Марс-2» для связи со спутниками, выведенными как на эллиптические, так и на круговые орбиты.

Перевозимая передающая станция «Марс» включает в себя обычный комплекс аппаратуры для передачи цветного изображения и звукового сопровождения как из специальных студий, так и из внестудийных объектов. Но глав-

ным в этой аппаратуре является СВЧ передатчик вместе с остронаправленной антенной, устройствами ее слежения за спутником связи и комплексом контрольно-измерительной аппаратуры. Эта станция передает на Останкинский технический телецентр сигналы изображения и звукового сопровождения практически из любой точки земного шара. Принятые же в Москве со спутника связи телевизионные сигналы начинают свой обычный путь к телезрителям. Для части из них этот путь проходит через тот же спутник связи, через который сигналы передавались в Москву, но уже на приемную сеть станций «Орбита» и, конечно, в другом частотном диапазоне.

Система «Орбита» и Единая автоматизированная система связи Советского Союза. В современных условиях все более остро встает проблема управления множеством взаимосвязанных процессов и явлений в нашей жизни. Все более быстрыми темпами нарастает поток информации о состоянии дел в многочисленных отраслях народного хозяйства. Эти данные необходимо быстро фиксировать, анализировать, обобщать, и во все более короткие сроки по результатам анализа надо принимать решения. Подобные задачи могут быть решены при широком использовании современных электронных вычислительных машин и современного оборудования в системах связи.

Разрозненные системы связи — телефонная, телеграфная, космическая, радиосвязь и др., — какими бы совершенными они не были, не могут удовлетворить потребности в связи. Необходима Единая автоматизированная система связи (ЕАСС) в масштабе страны, в которой все виды связи в совокупности и в каждом населенном пункте полностью удовлетворяли бы все нужды связи. Над созданием такой системы уже несколько последних лет работают связисты, радиотехническая и электронная промышленность. Если в вычислительной технике СВЧ приборов немного, то в системе связи электроника СВЧ занимает одно из ведущих мест из-за возможности иметь огромное количество каналов связи по сравнению с радио- и проводной связью в области длинных, средних и коротких волн.

Система космической связи «Орбита», в особенности для удаленных от Москвы районов, играет все возрастающую роль по мере укомплектования как передающих, так и приемных станций многоствольной и многоканальной аппаратурой связи. Так, аппаратура уплотнения каналов типа «Дружба», предназначенная для магистральных радиорелейных линий, может быть применена и в системе «Орбита». В каждом стволе эта аппаратура позволяет 7200 абонентам одновременно вести телефонные переговоры.

По мере создания ЕАСС не только разрабатывается и вступает в строй все большее количество автоматизированных систем управления отраслью (ОАСУ), например радиотехнической, промышленности средств связи и т. д., но постепенно создаются другие общегосударственные единые системы, такие, как Единая сеть вычислительных центров страны, Единая государственная система навигации и автоматической посадки самолетов и т. д.

Система «Орбита» является первой, самой большой и разветвленной национальной системой космической связи в мире, в других странах также ведутся работы по созданию систем аналогичного назначения. Так, под эгидой США создана международная система спутниковой связи «Интелсат» (системы «Интелсат 4» и «Интелсат 5»).

В последние годы в США были запущены усовершенствованные спутники связи, в том числе и стационарные, которые «висят» на стационарных орбитах в зоне прямой видимости наземных пунктов Европы, Азии, Америки и Африки.

СИСТЕМА «ЭКРАН» ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕВИДЕНИЯ ЧЕРЕЗ СПУТНИК СВЯЗИ, ВЫВЕДЕННЫЙ НА ГЕОСТАЦИОНАРНУЮ ОРБИТУ

26 октября 1976 г. на геостационарную (т. е. круговую) орбиту выведен спутник связи «Экран» (его международный регистрационный индекс в Международной комисси электросвязи «Стационар-1») для передачи на антенны коллективного и индивидуального пользования цветной программы Центрального телевидения в малонаселенных районах нашей страны.

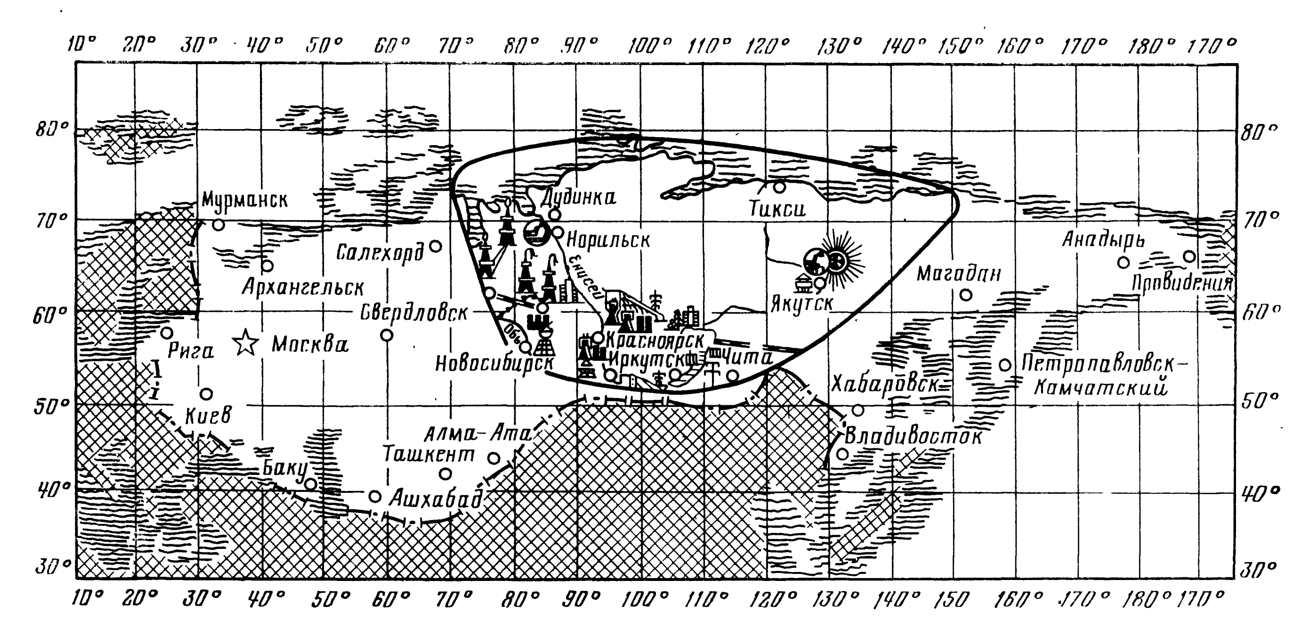


Рис. 59. Гарантированная зона обслуживания спутником связи системы «Экран», выведенным на геостационарную орбиту 26 октября 1976 г.

С введением первой очереди системы «Экран» в эксплуатацию к 200-миллионной аудитории телезрителей в Советском Союзе прибавились к середине 1977 г. еще около 20 млн. человек, а территория обслуживания телевидением возросла с одной пятой до двух третей всей площади нашей страны.

Спутник типа «Экран» практически неподвижно находится над точкой земной поверхности с координатами 0° северной широты (экватор) и 99° восточной долготы. Гарантированная зона обслуживания этим спутником показана на рис. 59, из которого видно, что первая очередь системы «Экран» позволяет вести прием одной цветной телевизионной программы на территории Западной и Центральной Сибири, Крайнего Севера СССР.

Рассмотрим последовательно передачу телевизионного сигнала из Москвы через спутник связи «Экран».

Телевизионный сигнал цветного изображения вместе с сигналом звукового сопровождения на поднесущей частоте 6,5 МГц из технического телецентра в Останкине передается по радиорелейной линии на наземную передающую станцию космической связи, расположенную в Подмосковье (рис. 60). Эта станция

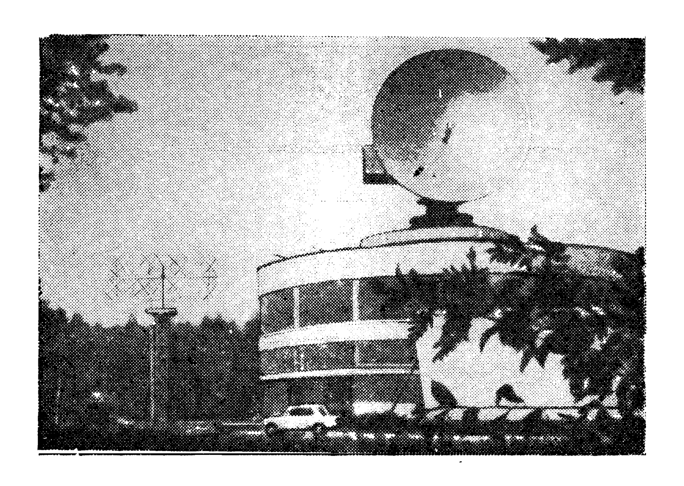


Рис. 60. Передающая станция космической системы телевизионного вещания «Экран»

оборудована параболической передающей антенной диаметром 12 м; мощным СВЧ передатчиком и комплексом контрольно-измерительной аппаратуры. На передающей станции поступившие по радиорелейной линии из Москвы телевизионные сигналы модулируют по частоте несущую 6,2 ГГц ($\lambda=4{,}85$ см) с девиацией ± 11 МГц. Как и в системе «Орбита», здесь применено временно́е уплотнение сигналов изображения сигналами звукового сопровождения. СВЧ сигнал усиливается и излучается в направлении искусственного спутника Земли. На спутнике принятый СВЧ сигнал преобразуется в сигнал промежуточной частоты, после усиления на этой частоте переносится в дециметровый диапазон волн и затем снова усиливается примерно до 300 Вт. Для излучения в сторону Земли используются остронаправленные антенны с коэффициентом усиления около 34 дБ (2500 раз по мощности), а передача ведется в дециметровом диапазоне в полосе 702—726 МГц ($\lambda_{ср}=42$ см).

В целом напряженность электромагнитного поля излученных со спутника телевизионных сигналов в зоне обслуживания достаточна для приема их на широкую сеть сравнительно простых антенных систем и приемных устройств дециметрового диапазона волн.

Приемное устройство коллективного пользования выполнено в виде радиоаппаратной стойки размерами 140×70×34 см, которая вместе с антенной системой может быть установлена в зданиях почтовых отделений и других общественных зданиях отдаленных населенных пунктов. Приемная антенна уста-

новки коллективного пользования состоит из 32 отдельных антенн типа «волновой канал». Каждое полотно имеет 30 скрещенных под прямым углом директоров, вибратор и рефлектор небольшой длины — 21 см. В антенне имеется четыре ряда по восемь полотен в каждом; ее усиление превышает 30 дБ.

В приемнике применены высокочувствительный усилитель высокой частоты на транзисторах (его шумовая температура — менее 450 К), смеситель с гетеродином, усилитель промежуточной частоты и высококачественный демодулятор принятого частотно-модулированного сигнала.

Рассматриваемое приемное устройство выполняет те же функции, что и наземная приемная станция системы «Орбита».

В отдаленных и малонаселенных пунктах, где нет отделения связи, вместо приемной установки коллективного пользования могут быть применены упрощенная приемная установка или индивидуальные телевизоры типа «Экран-4М», предназначенные для непосредственного приема телевизионных сигналов спутника связи.

Антенна упрощенной приемной установки состоит всего лишь из четырех полотен, расположенных в два этажа. Она может быть установлена непосредственно на крыше дома аналогично обычным телевизионным коллективным антеннам. Ее усиление равно примерно 20 дБ. В приемнике упрощенной установки использованы те же элементы, что и в коллективной, отсутствуют только резервный тракт и измерительный прибор. Размеры установки 44×24×16 см (рис. 61). Фактически это небольшая приставка к обычному цветному телевизору. В целом упрощенная установка достаточно надежна в работе и требует лишь довольно редких периодических осмотров.

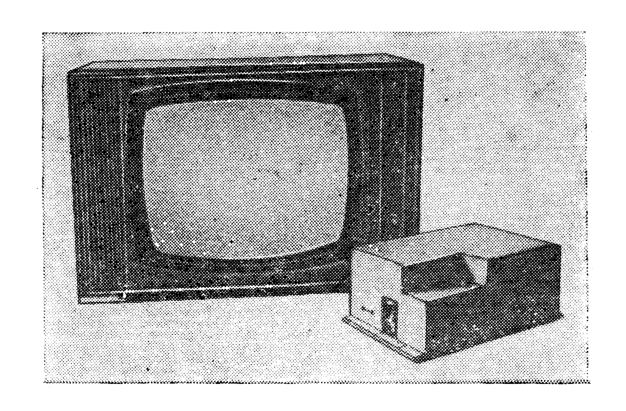


Рис. 61. Приемное устройство упрощенной приемной установки системы «Экран»

Естественно, что качество приема с помощью упрощенной установки несколько понижено, однако оно полностью соответствует нормам для зон обслуживания стандартных передающих телевизионных станций.

В заключение еще раз подчеркнем, что ни в одной стране мира нет такой развитой сети космической связи на сверхвысоких частотах, как в нашей стране.

Рассмотрим дальнейшее использование принятых телевизионных сигналов. Так, в случае коллективной приемной установки демодулированный сигнал подается на местную, обычно мощную ретрансляционную станцию, где модулирует несущую в одном из 12 стандартных телевизионных каналов. В зоне обслуживания этого ретранслятора прием ведется на обычные телевизоры цветного и черно-белого изображения.

Упрощенная приемная установка может быть использована в сочетании с маломощной ретрансляционной станцией либо даже с одним или несколькими отдельными телевизионными приемниками.

ПРЯМАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ ТЕЛЕВИДЕНИЯ ЧЕРЕЗ КОСМОС

Как отмечалось, при передаче телевидения по системам связи «Орбита» и «Экран» в телевизионных приемниках ничего не меняется. Каждая приемная станция типа «Орбита» работает совместно с местным центром или мощной ретрансляционной станцией, которые на частотах метрового диапазона в стандартных телевизионных каналах осуществляют передачу телевизионных программ. Радиус действия ретрансляторов определяется прежде всего высотой передающей антенны и составляет 50—100 км. Ясно, что для перекрытия по площади всей нашей страны требуется огромное количество подобных ретрансляторов.

В тех же местах, где еще нет ретрансляторов на базе приемных станций «Орбита» и «Экран» или где их нецелесообразно строить по экономическим соображениям, желателен прямой прием телевидения со спутников связи типа «Молния» на специальные телевизионные приемники. И здесь снова необходимы сверхвысокие частоты. Так как ретрансляция через спутники связи на приемные станции сети «Орбита» идет на СВЧ, то и телевизионные приемники прямого телевидения должны быть сверхвысокочастотными и должны непосредственно принимать сигналы со спутников связи.

Рассмотрим особенности подобных приемников. Одним из рабочих диапазонов для телевизионных приемников в системе прямого телевизионного вещания является диапазон 12 ГГц. Приемник, как обычно, супергетеродинный, должен иметь гетеродин, работающий в этом же диапазоне. Конечно, как это принято в современных телевизорах, и в СВЧ приемниках стремятся в возможно большей степени использовать транзисторы. Так, в СВЧ гетеродине может быть использован арсенид-галлиевый лавинно-пролетный диод (ЛПД), смонтированный в объемном резонаторе. Здесь довольно трудно достичь стабильной настройки в течение длительного времени, т. е. в течение всего времени приема телепередачи. Требуемую стабильность можно получить, если удастся до минимума снизить температурные уходы частоты. Одним из вариантов решения подобной задачи является применение медного объемного резонатора специальной конструкции. Он имеет отрицательный температурный коэффициент частоты (ТКЧ), равный примерно 500 кГц/°С. Лавинно-пролетный диод имеет положительный ТКЧ, поэтому результирующий ТКЧ такого генератора может быть близким к нулю.

Мощность гетеродина на ЛПД в диапазоне 12 ГГц вполне достаточна и равна 10 мВт (например, при рабочем токе 17 мА и напряжении 50 В). Гетеродин рассмотренного типа конструктивно проще и дешевле, чем самые первые экспериментальные гетеродины на основе кварцевого генератора и умножителя частоты с многократным коэффициентом умножения. Диоды Ганна для подобного гетеродина, по-видимому, менее пригодны, хотя и обладают меньшим коэффициентом шума, так как у них знак ТКЧ совпадает со знаком ТКЧ резонатора. Остальная схема телевизора прямого телевещания через космос, начиная с усилителя промежуточной частоты, принципиально не отличается от схемы обычных телевизионных приемников.

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ КОСМОСА НА ЗЕМЛЮ

СХЕМА КОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Ограниченность запасов ископаемого топлива на Земле, загрязнение окружающей среды при производстве электрической энергии на тепловых электростанциях при непрерывном росте потребностей человечества в энергии вызывают необходимость в ускорении исследований и разработки новых источников энергии.

Практически неисчерпаемым источником энергии является солнечная энергия, приходящаяся на освещенную Солнцем поверхность Земли. Подсчитано, что солнечная энергия, «падающая» в течение года только на Аравийский полуостров, более чем вдвое превышает энергию нефтяных запасов всего земного шара, известных в 70-е годы. До последнего времени использование этого ог-

ромного источника энергии было практически ничтожным. Нашли применение солнечные водонагреватели в местностях с холодным климатом, но с большим количеством солнечных дней для теплиц и бытовых нужд в жилых домах; небольшие солнечные электростанции, используемые, например, для электропитания телевизионных передатчиков в Африке или маяков нефтяных вышек; опреснители соленых вод в пустынях и т. д.

Почти все современные космические аппараты получают электрическую энергию за счет солнечных батарей, непосредственно преобразующих солнечную энергию в энергию постоянного электрического тока. Солнечные батареи в космосе могут быть развернуты при современном состоянии техники не только на площади в несколько десятков квадратных метров для получения мощности электрического тока порядка единиц киловатт, а могут занимать в принципе десятки и сотни гектаров и почти непрерывно генерировать мощность, измеряемую в мегаваттах. Солнечные батареи, расположенные в космосе, примерно 99% времени суток освещаются Солнцем и погружаются в темноту только во время затмений. Для передачи же на Землю столь большой мощности снова оказываются наиболее пригодными беспроводные линии передачи на сверхвысоких частотах, не зависящие практически от атмосферных условий на Земле. Принципиально все элементы подобных линий передачи (ЛЭП) в той или иной мере уже разработаны.

Один из вариантов схем мощной космической электростанции изображен на рис. 62. Солнечная батарея при мощности 5 млн. кВт (примерно мощность таких гидроэлектростанций, как Братская или Красноярская) будет иметь вид

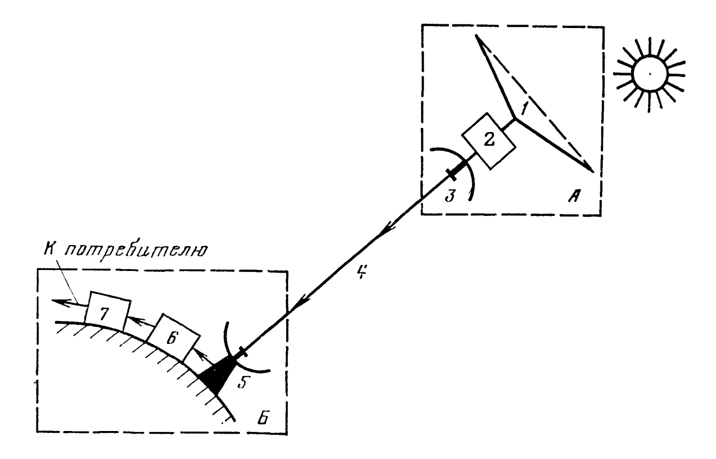


Рис. 62. Схема мощной космической электростанции на искусственном спутнике Земли:

А — космическая электростанция; *Б* — наземная станция преобразования СВЧ энергии в электроэнергию переменного тока промышленной частоты (*1* — солнечные батареи; *2* — мощный СВЧ генератор; *3* — передающая антенна; *4* — беспроволочная ЛЭП на СВЧ; *5* — приемная антенна; *6* — преобразователь СВЧ энергии в энергию постоянного тока; *7* — преобразователь постоянного тока в переменный ток промышленной частоты)

огромной бабочки с крыльями размером 10×12 км. Доставлять на орбиту ее элементы можно в виде рулонов тончайшей ленты из кремния с добавкой небольшого количества примесей, например бора, благодаря которому обеспечивается проводимость положительных электрических зарядов. В поверхностный слой этой ленты методом диффузии должны быть введены примеси фосфора для создания проводимости отрицательных электрических зарядов. Длина ленты в каждом рулоне может достигать 100 м и более. Космическую электростанцию предполагается смонтировать на обитаемом искусственном спутнике Земли, выведенным на синхронную с вращением Земли орбиту с апогеем около

40 тыс. км с тем, чтобы положение спутника относительно наземной приемной станции преобразования энергии было постоянным и неподвижным. На приемной стороне, т. е. на Земле, высокоэффективное преобразование СВЧ энергии в энергию постоянного тока вероятнее всего будет осуществляться путем применения твердотельных СВЧ приборов — арсенид-галлиевых диодов и диодов с барьером Шоттки, имеющих к.п.д. преобразования свыше 80% на частоте 3 ГГц. Так как их единичная мощность невелика (50—100 Вт), то возможным техническим решением является создание на Земле многоэлементной антенны-выпрямителя — ректенны, каждый элемент которой может состоять из полуволнового вибратора и согласованной с ним простой выпрямительной цепи на полупроводниковых СВЧ приборах.

Чтобы в СВЧ диапазоне волн рассеяние СВЧ энергии было не слишком велико, как передающая, так и приемная антенны должны быть остронаправленными. Так, для наземной станции приемная антенна должна иметь диаметр около 8 км.

Эффективность беспроволочной передачи электромагнитной энергии в любом диапазоне частот, в том числе и на СВЧ, определяется произведением излучаемой мощности на площадь передающей антенны. У современных радиолокаторов диапазона волн 10 см это произведение равняется 10^7 Вт·м². Предполагается, что оно возрастет до 10^{10} Вт·м². Для экономически выгодной космической электростанции это произведение необходимо увеличить до 10^{16} Вт·м². Но главная в настоящее время проблема — это удешевление доставки в космос многих тонн оборудования и материалов. Из других инженерных задач следует отметить проблему тепловой устойчивости, организацию технического обслуживания в космосе, выдерживание жестких допусков на размеры огромных антенн, безопасность от СВЧ излучения и т. д.

СВЧ ПРИБОРЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Из всего многообразия научных и технических проблем, возникающих при практическом осуществлении этой системы, рассмотрим только СВЧ линию электропередачи от мощного генератора СВЧ на космической электростанции до преобразователя СВЧ энергии в энергию постоянного тока на наземной станции преобразования энергии. Для конкретности будем рассматривать солнечную электростанцию, сооруженную в ближнем к Земле космосе, мощностью 5 млн. кВт (5000 МВт, т. е. 5 ГВт).

По какому принципу строить генераторы электрической энергии в космосе? По такому же, как на Земле, где чем выше мощность одного генератора, тем он экономичнее? В СВЧ электронике по этому пути идти нельзя. Во-первых, максимальная единичная мощность СВЧ генератора в непрерывном режиме в диапазоне волн 10 см пока не превышает единиц мегаватт, т. е. тысячной доли требуемых 5 ГБт, а, во-вторых, при дальнейшем повышении единичной мощности СВЧ прибора резко увеличатся его габариты, трудности борьбы с паразитными колебаниями, уменьшится надежность.

По-видимому, более рациональным будет иной путь — применение для преобразования энергии постоянного тока от солнечных батарей в СВЧ энергию приборов с мощностью единицы — десятки киловатт. Уровень мощности этих приборов должен быть выбран наивыгоднейшим с точки зрения простоты их конструкции и технологии производства, получения наивысшего к.п.д., надежности и долговечности. Не следует забывать, что за расчетный срок безотказной работы подобной электростанции принимают 30 лет, т. е. примерно 250 000 ч непрерывной работы. Из сказанного становится ясным, что одновременно работающих СВЧ приборов на космической электростанции будет достаточно много и там следует применять суммирующие мощность устройства. Например, для получения 5 ГВт суммарной мощности надо иметь один-два миллиона магнетронов мощностью 5 кВт, амплитронов или пролетных многорезонаторных клистронов, имеющих к.п.д., равный 85—90% (такой к.п.д. при использовании рекуперации пока достигнут только в лабораторных условиях). Тогда общий к.п.д. передачи солнечной энергии на Землю будет вполне приемлемым: 55—58%.

При столь большом числе работающих параллельно приборов общая надежность станции не понижается, как это может показаться на первый взгляд,

а, наоборот, увеличивается, так как выход из строя небольшого числа приборов не даст заметного снижения мощности передающей станции. Объясняется это тем, что в любой части станции имеет место параллельная работа большого числа элементов, т. е. имеется многократный резерв. Другими словами, здесь мы имеем дело с надежностью многоэлементной системы.

Многоэлементная система, содержащая электровакуумные приборы и, в частности, электровакуумные приборы СВЧ, имеет повышенную надежность потому, что выход из строя электровакуумного прибора СВЧ наиболее часто происходит либо в первые часы работы, либо после отработки своего срока службы. В течение первых десятков часов работы выходят из строя приборы с грубыми дефектами, возникшими при их производстве. Такие приборы не попадут в эксплуатацию, так как на заводе-изготовителе все приборы проходят так называемую стабилизирующую тренировку параметров в течение нескольких десятков часов. Далее очень небольшой процент выходит из строя при наработке сотен часов. А подавляющее большинство приборов после этого срока будет работать сотни тысяч часов надежно и бесперебойно лишь с постепенным снижением своих выходных параметров в пределах 10—15%.

Таким образом, передающая сторона космической электростанции вероятнее всего будет иметь активную фазированную антенную решетку наподобие современной радиолокационной станции дальнего обнаружения. Для ориентировки луча на Землю в центр приемной антенны каждый элемент антенны должен иметь быстродействующее устройство подстройки фазы.

На сегодняшний день для работы в космической электростанции могут быть пригодны магнетроны, амплитроны и пролетные многорезонаторные клистроны. Их особенность — возможность работы без вакуумной оболочки.

Магнетрон является генератором с самовозбуждением. Препятствием к его применению может стать невозможность получения требуемого срока службы 250 000 ч при использовании подогревного катода, а также принципиальные трудности получения к.п.д. выше 80%, что характерно для генераторов с самовозбуждением.

Амплитрон, являющийся усилителем типа М в наиболее вероятном диапазоне частот 2,45 ГГц, может иметь требуемый к.п.д. 85—90% при усилении примерно 7 дБ. Его масса может составлять около 3 кг при использовании самарий-кобальтового магнита и пиролитического графита для радиаторов охлаждения. Уже сейчас лабораторные образцы подобных амплитронов имеют к.п.д. более 80%, и существуют резервы еще некоторого повышения к.п.д. Интересна также возможность охлаждения амплитрона только за счет теплоизлучения. Требуемый срок службы может быть достигнут путем применения вторично-эмиссионного чисто металлического («холодного») катода. Но и в рассматриваемом применении существен один из главных недостатков амплитрона — малое усиление, что может привести к необходимости их каскадного включения. А для подавления гармоник и других паразитных сигналов должны быть использованы фильтры. Подстройка фазы выходного сигнала при работе амплитрона в фазированной антенной решетке может быть получена за счет изменения постоянного магнитного поля.

Наиболее перспективным вероятнее всего окажется многорезонаторный пролетный клистрон. Во-первых, его единичная мощность может быть в 10 раз больше и составлять 50 кВт в диапазоне частот 2,45 ГГц. Во-вторых, не требуется широкая полоса рабочих частот — ведь передачу достаточно вести на фиксированной частоте. А это даст возможность так оптимизировать с помощью электронных вычислительных машин настройку промежуточных резонаторов и длин пролетных каналов, чтобы получить наивысший к.п.д., достигающий 80% и более. Уже сейчас имеются лабораторные образцы пролетных клистронов с к.п.д. 75%. Дальнейшее увеличение к.п.д. до 87—88% может быть достигнуто применением двухступенчатой рекуперации на коллекторе.

Современные катоды для клистронов имеют срок службы 85—100 тыс. ч, т. е. свыше 10 лет. Это так называемые термоионные катоды с рабочей плотностью тока эмиссии 0,3 А/см².

Пролетные многорезонаторные клистроны для космического применения должны быть высоковольтными, т. е. иметь рабочие напряжения 30—50 кВ. Это позволяет резко снизить их рабочие токи, т. е. работать с малым значением первеанса (примерно от $0{,}4\cdot10^{-6}$ до $0{,}1\cdot10^{-6}$ А/В$^{3/2}$).

Однако, хотя клистронов в передающей ФАР требуется в 10 раз меньше, чем амплитронов, что является их важным преимуществом, пока стоимость каждого киловатта мощности у клистрона больше, чем у амплитрона.

Другими достоинствами клистрона перед амплитроном являются его высокое усиление (40—50 дБ), низкие шумы и возможность управления фазой выходного сигнала на низком уровне мощности около 1 Вт.

Недостатками пролетного многорезонаторного клистрона являются примерно в 1,5 раза более высокое рабочее напряжение, чем у амплитрона той же мощности, большие габариты, наличие подогревного катода и необходимость применения двухступенчатой рекуперации для повышения полного к.п.д. с 75 до 87—90%.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Будущее СВЧ электроники на транспорте. При скорости движения на железнодорожном транспорте, превышающей 300 км/ч, обычный элоктровоз не может быть использован из-за ненадежности съема энергии питания с контактного провода. Для решения этой проблемы рассматриваются возможности пуска скоростного поезда внутри волновода больших размеров и передачи по этому же волноводу СВЧ энергии для тяговых двигателей. Изучаются также возможности создания двигателей, непосредственно работающих от СВЧ энергии (эта область СВЧ электроники называется СВЧ динамикой).

Еще одно применение СВЧ электроники может быть весьма выгодным на железнодорожном транспорте. При формировании товарных поездов на сортировочных станциях требуется многократное считывание номеров вагонов. Эти номера бывают повреждены или загрязнены. Автоматизировать этот процесс можно с помощью уже существующих СВЧ электронных устройств. На каждом вагоне снизу должен быть укреплен набор из семи резонаторов (если отсчет ведется по семи цифрам номера). Скатываясь с сортировочной горки, вагон проходит над маломощным генератором качающейся частоты на отражательном клистроне, излучение которого с помощью рупорной антенны направлено вверх. Ответный принимаемый сигнал поступает в приемник от тех резонаторов и на тех частотах, которые характеризуют все семь значащих цифр номера. Далее эти данные могут быть обработаны с помощью ЭЦВМ и использованы как для управления стрелками, так и для составления отчетной документации.

Массовое применение больших интегральных схем в радиотехнических и вычислительных устройствах открыло возможность создания недорогих и небольших по размеру (умещаются на ладони) радиолокационных станций для автомобилей.

Обычные радиолокаторы импульсного действия могут применяться для сигнализации водителю о препятствии на дороге, определяя расстояние до препятствия.

Необычную задачу может решать радиолокатор, работающий на использовании эффекта Доплера. С его помощью можно определить скорость перемещения колеса относительно дороги при торможении. Если эта скорость меньше скорости простого качения на 15%, то торможение наиболее эффективно.

Таким образом, радиолокатор на эффекте Доплера может быть использован в системе автоматического регулирования торможения автомобиля на максимум эффективности.

СВЧ электроника в метеорологии. Быстрое определение прогноза погоды является весьма актуальной задачей. В этой важной для всего человечества работе совершенствуются не только методы прогнозирования и увеличивается число отсчетных точек метеоданных, но и начинают применяться принципиально новые методы.

При определении прогноза погоды в настоящее время широко используются электронные вычислительные машины. Метеоинформация, поступающая со многих станций, быстро обрабатывается, в результате чего заметно возросла точность прогнозов. Однако густая сеть метеостанций, расположенных на суше, резко ограничена берегами морей и океанов, откуда данные о метеообста-

новке передаются лишь несколькими научно-исследовательскими судами погоды. А ведь именно над просторами океанов зарождаются мощные ураганы и другие погодные явления, часто внезапно меняющие карты метеорологов. Недостаточны были и данные из труднодоступных горных и пустынных районов, из Арктики и Антарктиды, т. е. практически с трех четвертых поверхности Земли. Поэтому важное место в определении прогноза погоды связано с запуском метеорологических искусственных спутников Земли. С их помощью можно определить границы облачного покрова, зарождение ураганов, гроз, зон обильных снегопадов и т. д. По данным, полученным с искусственных спутников Земли, уже неоднократно передавались сигналы предупреждений о надвигающихся катастрофах, что позволяло подготовиться к встрече с ними, а значит, и снизить возможный ущерб.

Повышения точности в определении прогноза погоды можно ожидать при широком использовании в метеорологии СВЧ электроники, т. е. радиометрических и радиолокационных методов. Это позволяет сделать метеорологические спутники более «проницательными»: можно будет определять температуру и влажность атмосферы Земли во всей ее толщине от поверхности Земли вплоть до орбиты спутника. На основе таких данных более надежно можно предсказывать любые виды осадков. Подобные измерения основаны на измерении теплового радиоизлучения облаков на СВЧ с помощью так называемых СВЧ радиометров, т. е. особо чувствительных приемников, работающих одновременно в широком диапазоне частот. Так, информацию о сильных дождях приносят волны длиной 8 и 3,2 см, о менее сильных — 2,5; 1,6 и 1,35 см, бездождевые облака излучают на волне 0,8 см.

Измерения с помощью СВЧ радиометров ведутся одновременно на всех шести диапазонах. Длительность одного цикла — примерно 4 с. В это время принятое остронаправленной антенной излучение по волноводу подается на усилитель и далее на самописец, который записывает кривую распределения излучения в облаке. Одновременно с радиометрией ведутся и радиолокационные измерения: определяются верхняя и нижняя границы облака, положение так называемой нулевой изотермы, на которой начинают таять кристаллики льда, превращаясь в дождевые капли. Таким образом, метеорологическая радиолокация дает возможность определить размеры самого облака и той его части, которая служит источником осадков. Радиометрия же дополняет эту информацию данными о составе всей толщи облачного покрова и количестве влаги, которая в нем содержится.

Одним из первых СВЧ аппаратуру приняли на свой борт искусственные спутники Земли «Космос-243» и «Метеор-8». Радиометры СВЧ для них выполнены с учетом жестких требований — так их объем не превышает 1 л, масса 1 кг, а потребление электроэнергии 20 Вт.

На современном метеорологическом искусственном спутнике Земли СВЧ аппаратура работает во взаимодействии с другими приборами для научных исследований. Телевизионная аппаратура позволяет определять состояние верхних границ облаков и показывать их на земном телеэкране. Регистраторы инфракрасного излучения дают информацию до 600 м от верхней границы облаков. Остальную информацию дают радиолокация и СВЧ радиометрия, в том числе результаты измерения толщины льдов и снежного покрова.

Для экспресс-обработки всех этих богатейших данных с помощью ЭЦВМ необходимы устройства преобразования информации на язык, понятный вычислительной машине. Вот тогда метеорологи смогут полностью использовать для прогноза погоды все данные, получаемые как с метеостанций, расположенных на суше и на морских судах, так и с метеорологических спутников Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в этой книге описания электронных приборов СВЧ и их применений, конечно, далеко не исчерпывает всего их многообразия. Ограниченный объем книги позволил рассмотреть только наиболее распространенные и типичные явления в СВЧ электронике.

Что касается применений, то здесь авторы сознательно опустили такие важные и интересные разделы как радиолокация, радионавигация и радиоре-

лейные линии, описанию которых посвящена обширная научная и научно-популярная литература.

Основные характеристики существующих электронных приборов СВЧ, их отличительные особенности и прогнозы о дальнейшем развитии в ближайшее время приведены в табл. 4.

Насколько в недалеком будущем расширится использование СВЧ электроники в народном хозяйстве, можно показать на таком примере. Общепринятым считается мнение, что в современной жизни отказаться от применения ядохимикатов в сельском хозяйстве нельзя. Однако необходимо принимать меры по сокращению их использования. Одним из эффективных способов в этом направлении является применение электроники СВЧ. Уже первые опыты показали, что на участке, обработанном СВЧ излучением, урожай на 60% выше, чем при химической обработке. Кроме того, предварительная до сева обработка почвы СВЧ облучением задерживает появление сорняков, что тоже способствует повышению урожайности.

Другой пример применения СВЧ электроники в сельском хозяйстве относится уже к послеуборочным проблемам. Сушка хлопка-сырца СВЧ энергией перед его длительным хранением резко повышает качество и уменьшает отходы.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что с каждым годом области применения электроники сверхвысоких частот будут расширяться, обеспечивая и убыстряя развитие производительных сил и улучшая условия труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Ч. I. — М.: Высшая школа, 1970.

Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Ч. II. — М.: Высшая школа, 1972.

Изюмова Т. И., Свиридов В. Т. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. — М.: Энергия, 1975.

Уилхелм Дж. Укрощение солнечного луча. — За рубежом, 1976, № 25 (834), с. 20, 21.

Смагин Б. Теплые дожди. — Радио, 1975, № 8, с. 22, 23.

Шамшин В. С «Экрана» на телеэкран. — Радио, 1977, № 5, с. 1—3.

Таблица 4

Характеристики существующих приборов СВЧ

Группа, класс приборов	Вид приборов	f, ГГц	Вид перестройки частоты, полоса	Предельная мощность в режимах		$K_у$, дБ	$K_ш$, дБ	η, %	Отличительные особенности	Спрос (уровень продажи)	Тенденции развития и перспективы применения
				импульсном	непрерывном						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
С сеточным управлением	Триоды	0,3—16	Механическая	10 кВт	10 кВт	8,5—14	—	30—65	Простота конструкции, низкая стоимость	Постоянный	Маломощные заменяются твердотельными генераторами и усилителями
	Тетроды	0,3—1,3	»	15 МВт	100 кВт		—		Большая мощность, низкая стоимость	»	Увеличение частоты и мощности, создание модулей
Магнетронного типа	Обычные магнетроны	0,3—90	»	5 МВт	100 кВт	—	—	30—70	Большая мощность, высокий КПД	Снижается	Импульсные заменяются коаксиальными магнетронами
	Коаксиальные магнетроны	2,7—35	»	3 МВт	—	—	—	25—56	Высокая стабильность частоты, большая мощность, высокий КПД	Повышается	Увеличение частоты, повышение мощности и КПД
	Митроны	0,3—11	Электронная	—	500 Вт	—	—	45—72	Линейная электронная перестройка частоты	Снижается	Маломощные заменяются твердотельными генераторами

	ЛОВ М-типа	0,5—18	»	—	5 кВт	—	—	15—50	Большая мощность, электронная перестройка частоты	Повышается	Увеличение КПД и срока службы
	Магнетронные усилители	0,4—17	Полоса от 6 до 67%	10 МВт	100 кВт	7—20	—	30—90	Большая мощность, высокий КПД и широкая полоса	«	Увеличение усиления и расширение полосы пропускания
Лампы бегущей волны	Мощные	0,4—17	Полоса от 8 до 25%	10 МВт	100 кВт	35—60	—	10—50	Большая мощность, широкая полоса, большое усиление	Повышается	Увеличение частоты и мощности, повышение КПД
	Средней мощности	0,4—18	Полоса до 110%	10 кВт	1 кВт	30—60	—	15—58	Широкая полоса и большое усиление	«	Увеличение КПД, повышение мощности, увеличение срока службы
	Двухрежимные	1—17	Полоса до 67%	1 кВт	0,5 кВт	25—55	—	15—30	Многорежимность и широкая полоса	«	Увеличение КПД и перепада мощности
	Маломощные	0,5—40	Полоса до 67%	—	3 Вт	25—60	15—30	—	Большое усиление, широкая полоса, небольшие шумы	Снижается	Заменяются твердотельными усилителями
	Малошумящие	1—38	Полоса до 40%	—	100 мВт	25—30	4—10	—	Очень малые шумы, широкая полоса	«	Заменяются малошумящими твердотельными усилителями

Группа, класс приборов	Вид приборов	f, ГГц	Вид перестройки частоты, полоса	Предельная мощность в режимах		$K_у$, дБ	$K_ш$, дБ	η, %	Отличительные особенности	Спрос (уровень продажи)	Тенденции развития и перспективы применения
				импульсном	непрерывном						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Клистроны обратной волны	Мощные усилительные	0,3—30	Механическая	48 МВт	1 МВт	25—90	—	35—75	Большая мощность, высокий КПД, большое усиление, узкая полоса	Повышается	Повышение мощности, увеличение КПД и расширение полосы
	Генераторные	5—300	»	10 кВт	1 кВт	—	—	5—14	Большая мощность в миллиметровом диапазоне	»	Маломощные заменяются твердотельными генераторами
	Отражательные	0,8—220	Механическая и электронная	—	2,5 Вт	—	—	менее 1	Простота конструкции, низкая стоимость	Снижается	Заменяются твердотельными генераторами
Лампы обратной волны	ЛОВ О-типа	1—630	Электронная до 1·10%	—	10 Вт	—	—	1—5	Высокие рабочие частоты, широкая электронная перестройка	»	»
Твердотельные СВЧ генераторы	На лавинно-пролетных диодах	4—100	Электрическая до 30%	120 Вт	3 Вт	—	—	3—18	Высокая предельная частота, повышенная мощность, низкий КПД	Повышается	Увеличение выходной мощности и частоты

Твердотельные СВЧ генераторы	На диодах Ганна	2—60	Электрическая до 80%	—	0,3 Вт	—	—	2—12	Высокая предельная частота, малая мощность, низкий КПД	«	Увеличение выходной мощности и частоты, повышение КПД
	На биполярных транзисторах	0,3—10	Электрическая до 3 октав	—	0,5 Вт	—	—	25—80	Простота конструкции, высокий КПД Широкая перестройка	«	Увеличение частоты и повышение мощности
	На полевых транзисторах	2—20	То же	—	0,1 Вт	—	—	25—75	То же	«	Увеличение частоты и повышение мощности
Твердотельные СВЧ усилители	На туннельных диодах	0,5—18	Широкополосные, полоса до 67%	—	—	10—17	4—7	—	Малые шумы, широкая полоса, малая выходная мощность	Снижается	Заменяются транзисторными усилителями
	На лавинно-пролетных диодах	4—94	Узкополосные, полоса до 15%	1,2 кВт	100 кВт	5—10	10—35	—	Высокая предельная частота, повышенная выходная мощность	Повышается	Увеличение мощности Ниже 20 ГГц, заменяются транзисторными усилителями
	На диодах Ганна	4—40	Широкополосные, полоса до 67%	—	2 Вт	10—30	7—20	—	Высокая предельная частота, небольшие шумы	Снижается	На частотах ниже 20 ГГц заменяются транзисторными усилителями

Группа, класс приборов	Вид приборов	f, ГГц	Вид перестройки частоты, полоса	Предельная мощность в режимах: импульсном	Предельная мощность в режимах: непрерывном	$K_у$, дБ	$K_ш$, дБ	η, %	Отличительные особенности	Спрос (уровень продажи)	Тенденции развития и перспективы применения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Усилители мощности на биполярных транзисторах	0,3—6	То же	1 кВт	1 кВт	5—10	—	10—20	Простота конструкции, повышенная мощность	Повышается	Увеличение выходной мощности и полосы
	Малошумящие на биполярных транзисторах	0,3—6	Широкополосные, полоса до 67%	—	—	5—10	1,5—6	—	Простота конструкции, малые шумы	Повышается	Увеличение частоты и усиления, снижение шумов
Твердотельные СВЧ усилители	Малошумящие на полевых транзисторах	2—18	То же	—	—	5—10	1,2—8	—	То же	«	То же
	Неохлаждаемые параметрические	0,5—16	Узкополосные, полоса до 12%	—	—	15—20	1,3—2,2	—	Малые шумы, сложность конструкции	Снижается	Заменяются транзисторными малошумящими усилителями
	Охлаждаемые параметрические	0,5—35	То же	—	—	15—20	0,1—0,8	—	Очень малые шумы, сложность конструкции	С тенденцией к снижению	Заменяются неохлаждаемыми усилителями

[1] Для твердотельных СВЧ усилителей коэффициент усиления приведен из расчета на один каскад.

СОДЕРЖАНИЕ

Юрий Никитич Пчельников, Владимир Тимофеевич Свиридов

ЭЛЕКТРОНИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Редактор М. В. Благовещенский
Редактор издательства Т. В. Жукова
Художник В. Д. Козлов
Художественный редактор Е. Н. Кованов
Технический редактор Л. А. Горшкова
Корректор И. Г. Зыкова

ИБ № 1591 (Энергия)

Сдано в набор 15.05.81 г. Подп. в печ. 15.07.81 г.
Т-06614 Формат 60×90/16 Бумага кн.-журн. Гарнитура литературная Печать высокая
Усл. печ. л. 6,0 Усл. кр.-отт. 6,375 Уч.-изд. л. 8,79 Тираж 80 000 экз. Изд. № 19428
Зак. № 70/416 Цена 65 к.
Издательство «Радио и связь». Москва 101000, Главпочтамт, а/я 693

Набрано в типографии издательства «Радио и связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40
Отпечатано в Подольском филиале ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, 25

65 к.

«ИЗДАТЕЛЬСТВО «РАДИО И СВЯЗЬ»